

MATEMÁTICA DISCRETA I
FAMAF - UNC

ALEJANDRO TIRABOSCHI

Año 2021
FAMAF - UNC

LEER

AUTORES/COLABORADORES

- **Obra original:** coordinada y escrita por Alejandro Tiraboschi.
- **Colaboración:** Daniel Penazzi, colaborador de la sección “El criptosistema RSA” y autor principal del apéndice de grafos planares. Fernando Levstein colaborador en la sección “Máximo común divisor y mínimo común múltiplo”.
- **Correcciones y sugerencias:** Pedro Pury, Romina Arroyo, Leandro Cagliero, Fredy Restrepo, Patricia Kysbye.

LICENCIA

Este material es distribuido bajo la licencia Creative Commons

Atribución–CompartirIgual 4.0 Internacional

lo cual significa

- En cualquier explotación de la obra autorizada por la licencia será necesario reconocer los autores, colaboradores, etc.
- La distribución de la obra u obras derivadas se debe hacer con una licencia igual a la que regula la obra original.

Los detalles de la licencia pueden encontrarse en [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

ÍNDICE GENERAL

I NÚMEROS ENTEROS Y ARITMÉTICA

1	NÚMEROS ENTEROS	5
1.1	Aritmética	5
1.2	Ordenando los enteros	9
1.3	Definiciones recursivas	14
1.4	El principio de inducción	17
2	CONTEO	25
2.1	Principios básicos de conteo	25
2.2	Selecciones ordenadas con repetición	27
2.3	Selecciones ordenadas sin repetición	30
2.4	Selecciones sin orden	34
2.5	El teorema del binomio	39
3	DIVISIBILIDAD	45
3.1	Cociente y resto	45
3.2	Divisibilidad	49
3.3	El máximo común divisor y el mínimo común múltiplo	51
3.4	Factorización en primos	62
4	ARITMÉTICA MODULAR	71
4.1	Congruencias	71
4.2	Ecuación lineal de congruencia	76
4.3	Teorema de Fermat	81
4.4	El criptosistema RSA	83
4.5	Método binario para exponenciación modular (*)	88
4.6	Pruebas de primalidad (*)	91

II GRAFOS

5	GRAFOS	97
5.1	Grafos y sus representaciones	97
5.2	Isomorfismo de grafos	100
5.3	Valencias de un grafo	103
5.4	Camino y ciclos	105
5.5	Árboles	113
5.6	Coloreo de los vértices de un grafo	117
5.7	Algoritmos greedy en grafos	119
6	ÁRBOLES (*)	125
6.1	Contando las hojas de un árbol con raíz	125
6.2	Árboles expandidos y el problema MST	128

III APÉNDICES

A	PERMUTACIONES	137
A.1	Permutaciones	137
B	EL PRINCIPIO DEL TAMIZ	143
B.1	El principio del tamiz	143
C	LA FUNCIÓN DE EULER	147
C.1	La función de Euler	147
C.2	Una aplicación aritmética del principio del tamiz	149
D	GRAFOS PLANARES	153
D.1	Grafos planares	153
D.2	El problema del agua-luz-gas	157
D.3	El teorema de los cuatro colores	158

IV ÍNDICE

Índice alfabético	167
-------------------	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	El mínimo de S es -7	11
Figura 2	El dibujo correcto de \mathbb{Z}	12
Figura 3	El dibujo incorrecto de \mathbb{Z}	12
Figura 4	Una representación pictórica del grafo definido en (5.1.1).	98
Figura 5	La fiesta de Abril	98
Figura 6	G_1 y G_2 son isomorfos	101
Figura 7	G_1 y G_2 no son isomorfos	102
Figura 8	Probar que estos grafos no son isomorfos	102
Figura 9	Un grafo con dos componentes	107
Figura 10	El gran tour	108
Figura 11	El gran tour, de nuevo.	111
Figura 12	Algunos árboles	114
Figura 13	Dos caminos diferentes determinan un ciclo	115
Figura 14	El grafo para un problema de horarios	117
Figura 15	Encontrar el número cromático	119
Figura 16	El cubo es un grafo bipartito	121
Figura 17	Vértices adyacentes en el mismo nivel inducen un ciclo impar	122
Figura 18	Un árbol con raíz y sus niveles	125
Figura 19	Solución del problema de la moneda falsa cuando $r = 4$	128
Figura 20	Un grafo y uno de sus árboles expandidos	129
Figura 21	Un árbol expandido mínimo	130
Figura 22	Encontrar el MST	133
Figura 23	Dibujos de K_3	153
Figura 24	Dibujos de K_4	153
Figura 25	Un grafo planar	154
Figura 26	Regiones de un grafo planar	154
Figura 27	Eliminar una arista	155
Figura 28	Grafos acíclicos con menos de 3 aristas	156
Figura 29	Una solución tramposa	157
Figura 30	Luz-agua-gas es $K_{3,3}$	157
Figura 31	Grafos acíclicos con menos de 4 aristas y al menos 3 vértices	158
Figura 32	Un grafo no planar “básico”	158
Figura 33	x es un vértice de valencia 5 en el grafo planar.	161
Figura 34	Caminos de y a u y de z a w	161
Figura 35	Posibles configuraciones	162

PREFACIO

Las siguientes notas se han utilizado para el dictado del curso “Matemática Discreta I” del primer año de la carrera de ciencias de la computación de FAMAF-UNC. Han sido las notas principales en el dictado del año 2019 y en algunos años anteriores (desde 1995). Las notas están basadas en diversas fuentes, principalmente en los libros “Discrete Mathematics” de N. Biggs y “Notas de Álgebra I” de E. Gentile, pero a lo largo de los años ha habido numerosas modificaciones y agregados por parte de los diferentes docentes de la cátedra.

El objetivo de las notas es tratar de explicar de una manera simple conceptos aritméticos y algebraicos elementales, de tal forma que luego estos puedan ser utilizados como herramientas en la práctica profesional. En particular, uno de nuestros principales objetivos es el desarrollo de la madurez matemática y la habilidad para resolver problemas matemáticos relacionados con la aritmética, conteo y grafos. A nivel metodológico, el curso comienza con un enfoque formal pero intuitivo que se vuelve cada vez más riguroso a medida que aumenta el interés y las capacidades de abstracción de los alumnos.

Las notas se limitan casi exclusivamente al contenido dictado en el curso y las partes señaladas con (*) y los apéndices son optativos.

El primer capítulo introduce a los alumnos al formalismo de los números enteros como sistema axiomático. En la mitad final de este capítulo se estudia el concepto de definición recursiva y se demuestra y aplica el principio de inducción. En el segundo capítulo se estudian los principios de conteo y diversas técnicas relacionadas a los mismos. Diferentes aspectos de la aritmética elemental son estudiados en el tercer y cuarto capítulo. Como aplicación de lo aprendido en estos dos capítulos se explica el algoritmo RSA. Finalmente, los capítulos 5 y 6 estudian la teoría de grafos y árboles, temas clásicos de la matemática discreta.

Parte I

NÚMEROS ENTEROS Y ARITMÉTICA

NÚMEROS ENTEROS

1.1 ARITMÉTICA

Todo lector de este apunte conoce los *enteros*. En una etapa muy temprana de nuestras vidas conocemos los números enteros positivos o “números naturales”

$$1, 2, 3, 4, 5, \dots$$

Más adelante introducimos el 0 (cero), y los enteros negativos

$$-1, -2, -3, -4, -5, \dots$$

En este curso no nos preocupamos demasiado por el significado lógico y filosófico de estos objetos, pero necesitamos saber las propiedades que se supone que tienen. Si todos parten de las mismas suposiciones entonces todos llegarán a los mismos resultados. Estos supuestos son los llamados axiomas.

El punto de vista adoptado en este apunte es el señalado antes. Aceptamos sin reparo que existe un conjunto de objetos llamados *enteros* conteniendo los enteros positivos y los negativos, y el cero, familiares en nuestra temprana educación y experiencia. El conjunto de enteros se denotará por el símbolo especial \mathbb{Z} . Las propiedades de \mathbb{Z} serán dadas por una lista de axiomas, a partir de las cuales seremos capaces de deducir todos los resultados sobre números enteros que necesitaremos en las cuestiones subsiguientes. Empezaremos listando aquellos axiomas que tratan la suma y la multiplicación.

Adoptaremos las notaciones usuales $a + b$ para la suma de dos enteros a y b , y $a \cdot b$ (frecuentemente ab o también $a \times b$) para su producto. Pensamos en $+$ y \cdot como *operaciones* que a un par de enteros a y b les hacen corresponder un entero $a + b$ y otro $a \cdot b$. El hecho de que $a \cdot b$ y $a + b$ son enteros, y no algún objeto extraño como elefantes, es nuestra primera suposición, el axioma **I1**.

En la siguiente lista de axiomas a, b, c denotan enteros arbitrarios, y 0 y 1 denotan enteros especiales que cumplen las propiedades especificadas más abajo.

I1) $a + b$ y $a \cdot b$ pertenecen a \mathbb{Z} .

- I2) Conmutatividad.** $a + b = b + a$; $ab = ba$.
- I3) Asociatividad.** $(a + b) + c = a + (b + c)$; $(a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c)$.
- I4) Existencia de elemento neutro.** Existen números $0, 1 \in \mathbb{Z}$ con $0 \neq 1$ tal que $a + 0 = a$; $a \cdot 1 = a$.
- I5) Distributividad.** $a \cdot (b + c) = a \cdot b + a \cdot c$.
- I6) Existencia del inverso aditivo, también llamado opuesto.** Por cada a en \mathbb{Z} existe un único entero $-a$ en \mathbb{Z} tal que $a + (-a) = 0$.
- I7) Cancelación.** Si $a \neq 0$ y $a \cdot b = a \cdot c$, entonces $b = c$.

Debido a la ley de asociatividad para la suma, axioma **I3**, $(a + b) + c$ es igual a $a + (b + c)$ y por lo tanto podemos eliminar los paréntesis sin ambigüedad. Es decir, denotamos

$$a + b + c := (a + b) + c = a + (b + c).$$

De forma análoga, usaremos la notación

$$abc = (ab)c = a(bc).$$

Debido a la ley de conmutatividad, axioma **I2**, es claro que del axioma **I4** se deduce que $0 + a = a + 0 = a$ y $1 \cdot a = a \cdot 1 = a$. Análogamente, por **I2** e **I6** obtenemos que $-a + a = a + (-a) = 0$.

Una propiedad que debemos mencionar es la siguiente: si $a, b, c \in \mathbb{Z}$ y $a = b$, entonces $a + c = b + c$ y $ac = bc$. Esto se debe a que la suma y el producto son operaciones que, como acabamos de decir, toman un par de enteros y devuelven otro entero. Si $a = b$, entonces el par a, c es igual al par b, c y por lo tanto devuelven la misma suma y el mismo producto. Esta propiedad no es un axioma, sino una mera aplicación de la lógica formal.

Todos los axiomas corresponden a propiedades familiares de los enteros que aprendemos en distintos niveles de nuestra educación matemática. De ellas pueden deducirse la mayoría de las reglas aritméticas comunes de los enteros como en el siguiente ejemplo.

Ejemplo 1.1.1. Demostremos que, para todo n entero, el opuesto de $-n$ es n , es decir que

$$-(-n) = n.$$

Demostración. El axioma **I6** nos dice que $-(-n)$ es el único número que sumado a $-n$, da cero. Por lo tanto, para demostrar que $-(-n) = n$ basta ver que $(-n) + n = 0$. Esto se cumple puesto que

$$\begin{aligned} (-n) + n &= n + (-n) && \text{(axioma I2)} \\ &= 0 && \text{(axioma I6)} \end{aligned}$$

Por lo tanto $(-n) + n = 0$. □

Como ya dijimos, los números enteros vienen provistos con dos operaciones fundamentales, la suma y la multiplicación. A continuación definimos la resta o sustracción.

Definición 1.1.2. Si $a, b \in \mathbb{Z}$ definimos $a - b$ como la suma de a más el opuesto de b , es decir que $a - b = a + (-b)$ por definición.

Ahora demostremos una propiedad básica de la resta.

Ejemplo. Demostremos que para dos enteros m y n cualesquiera

$$m - (-n) = m + n.$$

Demostración. Por la definición de sustracción, $m - (-n)$ es la suma $m + (-(-n))$, es decir

$$m - (-n) = m + (-(-n)).$$

Por el ejemplo 1.1.1 sabemos que $-(-n) = n$ y por lo tanto $m - (-n) = m + (-(-n)) = m + n$. □

Tanto formalismo, como el usado en las demostraciones realizadas en el ejemplo anterior, puede ser tedioso, pero nos permite comenzar a comprender la estructura de una demostración formal.

Proposición 1.1.3. Supongamos que existen dos enteros 0 y $0'$ ambos cumpliendo el axioma I₄, esto es

$$a + 0 = a, \quad a + 0' = a$$

para todo a de \mathbb{Z} . Entonces $0 = 0'$.

Demostración.

$$\begin{aligned} 0 &= 0 + 0' && \text{(axioma I}_4 \text{ aplicado a } 0 \text{ y con } 0' \text{ como neutro)} \\ &= 0' + 0 && \text{(axioma I}_2\text{)} \\ &= 0' && \text{(axioma I}_4 \text{ aplicado a } 0' \text{ y con } 0 \text{ como neutro).} \end{aligned}$$

□

El resultado anterior nos demuestra que hay un único elemento que cumple el axioma I₄ en lo que respecta a la suma. A este elemento lo denotamos 0 y lo denominamos el *elemento neutro de la suma*. Lo mismo podemos probar con el elemento neutro respecto al producto (ver ejercicio 3), es decir hay un único elemento, denotado 1 , que satisface el axioma I₄ en lo que se refiere al producto. A este elemento lo llamamos el *elemento neutro del producto*.

Proposición 1.1.4 (Regla de los signos). *Veamos que si $a, b \in \mathbb{Z}$ entonces*

$$(-a)(-b) = ab, \quad a(-b) = (-a)b = -(ab).$$

Demostración. Veremos que $a(-b) = -(ab)$. Los otros casos se dejan como ejercicio para el lector.

Una forma de demostrar este caso es observando que $-(ab)$ es el inverso aditivo de ab y comprobando que $a(-b)$ es también inverso aditivo de ab . Luego, por unicidad del inverso aditivo, se deduce que $a(-b) = -(ab)$.

$$\begin{aligned} ab + a(-b) &= a(b - b) && \text{axioma I5} \\ &= a \cdot 0 && \text{axioma I4} \\ &= 0 && \text{ejercicio 4.} \end{aligned}$$

Es decir $a(-b)$ es el inverso aditivo de ab , luego por la unicidad del inverso aditivo axioma I6, $a(-b) = -(ab)$. \square

Algunos resultados similares pueden encontrarse en los siguientes ejercicios. Como aún no tenemos todos los axiomas correspondientes a los enteros, los resultados no son particularmente interesantes, pero lo que importa es recordar que pueden ser probados sobre la base única de los axiomas.

§ Ejercicios

- 1) Demostrar la regla $(a + b)c = ac + bc$, explicando cada paso.
- 2) Como siempre x^2 denota $x \cdot x$. Demostrar que dados dos enteros a y b tal que $a + b \neq 0$, entonces existe un único c tal que $(a + b)c = a^2 - b^2$.
- 3) Probar que hay un único elemento neutro del producto.
- 4) La siguiente es una demostración de la fórmula $0x = 0$ usando solo los axiomas planteados antes. Escribir la demostración completa, explicando que axioma es usado en cada paso.

$$\begin{aligned} 0x &= (0 + 0)x && (\text{axioma}) \\ &= 0x + 0x. && (\text{axioma}) \end{aligned}$$

Luego $0x = 0x + 0x$. Sumando $-0x$ a ambos miembros de la igualdad, obtenemos

$$\begin{aligned} 0x + (-0x) &= 0x + 0x + (-0x) && (\text{usando lógica formal}) \\ 0 &= 0x + 0 && (\text{axioma dos veces}) \\ 0 &= 0x. && (\text{axioma}) \end{aligned}$$

1.2 ORDENANDO LOS ENTEROS

El orden natural de los enteros es tan importante como sus propiedades aritméticas. Desde el comienzo aprendemos los números en el orden 1, 2, 3, 4, 5, y el hecho de que 4 es “mayor” que 3 se convierte en algo de importancia práctica para nosotros. Expresamos esta idea formalmente diciendo que existe una relación que indicamos “ $<$ ” ($a < b$ se lee: a es menor que b o también b es mayor que a).

Solo cuatro axiomas se necesitan para especificar las propiedades básicas del símbolo $<$, y ellos son listados en lo que sigue. La numeración de los axiomas se continúa de la sección 1.1. Como antes, a , b y c denotan enteros arbitrarios.

I8) Ley de tricotomía. Vale una y sólo una de las relaciones siguientes:

$$a < b, \quad a = b, \quad b < a.$$

I9) Ley transitiva. Si $a < b$ y $b < c$, entonces $a < c$.

I10) Compatibilidad de la suma con el orden. Si $a < b$, entonces $a + c < b + c$.

I11) Compatibilidad del producto con el orden. Si $a < b$ y $0 < c$, entonces $ac < bc$.

Esta claro que podemos definir los otros símbolos de orden $>$, \leq y \geq , en términos de los símbolos $<$ e $=$. Diremos que $m > n$ si $n < m$, diremos que $m \leq n$ si $m < n$ o $m = n$. Finalmente, diremos que $m \geq n$ si $m > n$ o $m = n$. Es importante notar que el axioma I11 tiene una versión valedera para estos nuevos símbolos.

a) ($>$) Si $a > b$ y $c > 0$, entonces $ac > bc$.

b) (\leq) Si $a \leq b$ y $0 \leq c$, entonces $ac \leq bc$.

c) (\geq) Si $a \geq b$ y $c \geq 0$, entonces $ac \geq bc$.

Usando las definiciones de \geq , $<$, $>$ y el axioma I11 original es muy sencillo demostrar estas variantes. Por otro lado,

Proposición 1.2.1. Sean $a, b, c \in \mathbb{Z}$.

a) Si $c < 0$, entonces $0 < -c$.

b) Si $a < b$ y $c < 0$, entonces $ac > bc$.

Demostración ().*

a) Sumando $-c$ a ambos miembros de la desigualdad $c < 0$, obtenemos $c + (-c) < 0 + (-c)$ (compatibilidad de la suma con la relación de orden).

Por los axiomas de inverso aditivo y elemento neutro, la expresión se reduce a $0 < -c$.

b) Como $a < b$, si sumamos a ambos miembros de la desigualdad $-a - b$, por la compatibilidad de la suma con $<$, obtenemos $a - a - b < b - a - b$ y por la aplicación reiterada de los axiomas de inverso aditivo y elemento neutro obtenemos $-b < -a$. Por a) sabemos que $0 < -c$, por lo tanto, por **I11**, $(-b)(-c) < (-a)(-c)$. Aplicando la regla de los signos obtenemos $bc < ac$ y por lo tanto $ac > bc$.

□

Ya hemos usado (en axiomas **I4** e **I7**) el símbolo \neq que denota “no es igual a” o bien “es distinto a”. En general, cuando tachamos un símbolo, estamos indicando la negación de la relación que define. Por ejemplo, $a \not< b$ denota “a no es menor que b”.

Observación. Demostremos que $a \not< b$ es equivalente a $a \geq b$: por la ley de tricotomía axioma **I8** tenemos que solo vale una y solo una de las siguientes afirmaciones

$$a < b, \quad a = b, \quad b < a.$$

Como $a \not< b$, entonces vale una de las dos afirmaciones siguientes, $a = b$ o $b < a$, es decir vale que $a \geq b$. De forma análoga se prueba que $a \not\leq b$ si y sólo si $a > b$, $a \not\geq b$ si y sólo si $a \leq b$ y $a \not> b$ si y sólo si $a < b$.

Ejemplo 1.2.2. Demostremos las siguientes propiedades de \leq . Sean a, b y c enteros arbitrarios, entonces

O1) *Reflexividad.* $a \leq a$.

O2) *Antisimetría.* Si $a \leq b$ y $b \leq a$, entonces $a = b$.

O3) *Transitividad.* Si $a \leq b$ y $b \leq c$, entonces $a \leq c$.

Demostración.

(**O1**) Como $a = a$, tenemos entonces que $a \leq a$ (por definición de \leq).

(**O2**) Como $a \leq b$, tenemos que $a < b$ o bien $a = b$ (por tricotomía no pueden valer ambas). Si ocurriera que $a < b$, por la observación anterior, tendríamos que $a \not\geq b$, es decir $b \not\leq a$, lo cual es absurdo pues una de nuestras hipótesis es, justamente, lo contrario: $b \leq a$. Es decir, la única posibilidad que queda es que $a = b$.

(**O3**) Como $a \leq b$, entonces $a < b$ o bien $a = b$. Como $b \leq c$, entonces $b < c$ o bien $b = c$. Para hacer la demostración, debemos pensar en todas las posibles combinaciones de estas afirmaciones:

- $a < b$ y $b < c$. Es este caso, por **I9**, $a < c$. Luego $a \leq c$.
- $a < b$ y $b = c$. Luego $a < c$ y eso implica que $a \leq c$.
- $a = b$ y $b < c$. Luego $a < c$ y eso implica que $a \leq c$.
- $a = b$ y $b = c$. Es claro entonces que $a = c$, lo cual implica que $a \leq c$.

□

Una relación que satisfaga las tres propiedades anteriores (reflexividad, antisimetría y transitividad) es llamada *una relación de orden*. Observar que $<$ *no* es una relación de orden, en el sentido de la definición anterior.

A primera vista podría parecer que ya tenemos todas las propiedades que necesitamos de \mathbb{Z} , pero, sorprendentemente, aún falta un axioma de vital importancia. Supongamos que X es un subconjunto de \mathbb{Z} ; entonces diremos que el entero b es una *cota inferior* de X si

$$b \leq x \quad \text{para todo } x \in X.$$

Algunos subconjuntos no tienen cotas inferiores: por ejemplo, el conjunto de los enteros negativos $-1, -2, -3, \dots$, claramente no tiene cota inferior. Por otro lado, el conjunto S denotado por los números resaltados en la Fig. **1** tiene muchas cotas inferiores. Una mirada rápida nos dice que -9 por ejemplo es una cota inferior, mientras que una inspección más minuciosa revela que -7 es la “mejor” cota inferior, pues en realidad pertenece a S . En general, una cota inferior de un conjunto X que es a su vez es un elemento de X , es conocido como el *mínimo* de X .

$$-10, -9, -8, -7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, \mathbf{1}, \mathbf{2}, \mathbf{3}, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$$

Figura 1: El mínimo de S es -7 .

Nuestro último axioma para \mathbb{Z} afirma algo que es (aparentemente) una propiedad obvia.

I12) Si X es un subconjunto de \mathbb{Z} que no es vacío y tiene una cota inferior, entonces X tiene un mínimo.

El axioma **I12** es conocido como el *axioma de buena ordenación* o *axioma del buen orden* o *principio de buena ordenación*. Una buena forma de entender su significado es considerar X un conjunto de enteros acotado inferiormente y un juego en el cual dos personas eligen alternativamente un elemento de X , sujetos a la regla de que cada número debe ser estrictamente menor que el anterior. El axioma nos dice que cuando los números son enteros, el juego terminará; además el final se producirá cuando uno de los jugadores tenga el buen sentido de elegir el mínimo. Esta propiedad aparentemente

obvia *no* se mantiene necesariamente cuando tratamos con números que no son enteros, pues X puede no tener un mínimo aunque tenga una cota inferior. Por ejemplo supongamos que X es el conjunto de fracciones $3/2, 4/3, 5/4, \dots$ teniendo por forma general $(n+1)/n$, $n \geq 2$. Este conjunto tiene una cota inferior (1, por ejemplo) pero no tiene mínimo y por lo tanto los jugadores podrían seguir jugando para siempre, eligiendo fracciones más y más cercanas a 1.

El axioma del buen orden nos da una justificación firme para nuestro intuitivo dibujo de los enteros: un conjunto de puntos regularmente espaciados sobre una línea recta, que se extiende indefinidamente en ambas direcciones como en la Fig. 2. En particular dice que no podemos acercarnos más y más a un entero sin alcanzarlo, de forma que el dibujo de la Fig. 3 no es correcto.



Figura 2: El dibujo correcto de \mathbb{Z} .



Figura 3: El dibujo incorrecto de \mathbb{Z} .

El hecho de que haya espacios vacíos entre los enteros nos lleva a decir que el conjunto \mathbb{Z} es *discreto* y es esta propiedad la que da origen al nombre “matemática discreta”. En cálculo y análisis, los procesos de límite son de fundamental importancia, y es preciso usar aquellos sistemas numéricos que son *continuos*, en vez de los discretos.

El siguiente resultado es obvio, pero debe ser demostrado. Sin embargo, la demostración es bastante compleja y sólo se da por completitud.

Proposición 1.2.3. *1 es el menor entero mayor que 0.*

Demostración ().* Primero debemos probar que $0 < 1$. Ahora bien, como $0 \neq 1$ (por axioma I4), por la ley de tricotomía (axioma I8), debe ocurrir que $0 < 1$ o $1 < 0$. Supongamos que $1 < 0$, luego por proposición 1.2.1, $1 \cdot 1 > 1 \cdot 0$. Como 1 es elemento neutro de la multiplicación, obtenemos $1 > 0$, que contradice nuestra suposición. Esta contradicción vino de suponer que $1 < 0$. Por lo tanto, $0 < 1$.

Probaremos ahora que no existe a entero tal que $0 < a < 1$ y lo haremos por el absurdo: supongamos que existe $a \in \mathbb{Z}$ tal que $0 < a < 1$ y sea

$$X = \{a \in \mathbb{Z} : 0 < a < 1\}.$$

La suposición que hicimos implica que X es no vacío. Dado que todos los elementos de X son positivos, X es un subconjunto de \mathbb{Z} acotado inferiormente (0 es cota inferior). Por el axioma del buen orden (axioma I12) resulta que X tiene un elemento mínimo, que llamaremos a_0 , y cumple

$$0 < a_0 < 1.$$

Usamos ahora la compatibilidad del producto con la relación de orden (I11): por un lado multiplicamos por a_0 la desigualdad $0 < a_0$ y obtenemos $0 < a_0^2$, y por otro lado multiplicamos por a_0 la desigualdad $a_0 < 1$ y obtenemos $a_0^2 < a_0$. Es decir

$$0 < a_0^2 < a_0 < 1.$$

La desigualdad $0 < a_0^2 < 1$ dice que $a_0^2 \in X$ pero la desigualdad $a_0^2 < a_0$ dice que a_0 no es el mínimo elemento de X , lo cual es una contradicción pues dijimos que a_0 es el mínimo elemento de X . El absurdo vino de suponer que existe $a \in \mathbb{Z}$ tal que $0 < a < 1$. \square

§ Ejercicios

- 1) Sean $a, b \in \mathbb{Z}$ tal que $a, b \neq 0$. Probar que $ab \neq 0$. (Ayuda: considerar primero el caso $a > 0$ y $b > 0$).
- 2) Demostrar que \geq es una relación de orden.
- 3) Demostrar que dados cualesquiera $a, b, c \in \mathbb{Z}$ vale que si $a < b$ y $0 \leq c$, entonces $ac \leq bc$.
- 4) Demostrar que si $a \leq b$ y $c \leq 0$, entonces $bc \leq ac$.
- 5) Demostrar que $0 \leq x^2$ para todo x en \mathbb{Z} .
- 6) Deducir de la proposición 1.2.3 que $n + 1$ es el menor entero mayor que n para todo n en \mathbb{Z} .
- 7) Demostrar que si un conjunto X tiene mínimo, este es único. Dicho más formalmente: demostrar que si existen $c, c' \in X$ tal que $c \leq x$ y $c' \leq x$ para todo $x \in X$, entonces $c = c'$.
- 8) En cada uno de los siguientes casos decir si el conjunto X tiene o no una cota inferior, y si la tiene, encontrar el mínimo.
 - (1) $X = \{x \in \mathbb{Z} | x^2 \leq 16\}$.
 - (2) $X = \{x \in \mathbb{Z} | x = 2y \text{ para algún } y \in \mathbb{Z}\}$.
 - (3) $X = \{x \in \mathbb{Z} | x \leq 100x\}$.
- 9) Un subconjunto Y de \mathbb{Z} se dice que tiene una *cota superior* c si $c \geq y$ para todo $y \in Y$. Una cota superior que además es un elemento de Y

es llamada el *máximo* de Y . Usar el axioma **I12** para demostrar que si Y es no vacío y tiene una cota superior, entonces tiene máximo. [Ayuda: aplicar el axioma al conjunto cuyos elementos son $-y$ ($y \in Y$).]

- 10) Los enteros n que satisfacen $1 \leq n \leq 25$ están acomodados en forma arbitraria en un arreglo cuadrado de cinco filas y cinco columnas. Se selecciona el máximo de cada fila, y se denota s al mínimo entre ellos. De manera similar, el mínimo de cada columna es seleccionado y t denota al máximo entre ellos. Demostrar que $s \geq t$ y de un ejemplo en el cual $s \neq t$.

1.3 DEFINICIONES RECURSIVAS

Sea \mathbb{N} el conjunto de enteros positivos, esto es

$$\mathbb{N} = \{n \in \mathbb{Z} | n \geq 1\},$$

y denotemos \mathbb{N}_0 el conjunto $\mathbb{N} \cup \{0\}$, esto es

$$\mathbb{N}_0 = \{n \in \mathbb{Z} | n \geq 0\}.$$

\mathbb{N} es llamado el conjunto de *números naturales*. Si X es un subconjunto de \mathbb{N} (o de \mathbb{N}_0) entonces automáticamente tiene una cota inferior, pues cada elemento x de X satisface $x \geq 1$ (o $x \geq 0$). Así, en este caso el axioma del buen orden toma la forma

si X es un subconjunto no vacío de \mathbb{N} o \mathbb{N}_0 entonces X tiene un mínimo.

Esta la forma más usada en la práctica.

Nuestro primer uso del axioma del buen orden será para justificar un procedimiento muy usual. Frecuentemente encontramos una expresión de la forma u_n , donde n indica cualquier entero positivo: por ejemplo, podríamos tener $u_n = 3n + 2$, o $u_n = (n + 1)(n + 2)(n + 3)$. En estos ejemplos u_n es dado por una fórmula explícita y no existe dificultad en calcular u_n cuando se nos da un valor específico para n . Sin embargo en muchos casos no conocemos una fórmula para u_n ; es más, nuestro problema puede ser encontrarla. En estos casos pueden darnos ciertos valores de u_n para enteros positivos n pequeños, y una relación entre el u_n general y algunos de los u_r con $r < n$. Por ejemplo, supongamos nos es dado

$$u_1 = 1, \quad u_2 = 2, \quad u_n = u_{n-1} + u_{n-2}, \quad n \geq 3.$$

Para calcular los valores de u_n para todo n de \mathbb{N} podemos proceder como sigue:

$$\begin{aligned} u_3 &= u_2 + u_1 = 2 + 1 = 3, \\ u_4 &= u_3 + u_2 = 3 + 2 = 5, \\ u_5 &= u_4 + u_3 = 5 + 3 = 8, \end{aligned}$$

y así siguiendo. Éste es un ejemplo de una *definición recursiva*. Es “obvio” que el método dará un valor único de u_n para todo entero positivo n . Pero hablando estrictamente necesitamos el axioma del buen orden para justificar la conclusión a través de las siguientes líneas.

Supongamos que existe un entero positivo n para el cual u_n no está definido de manera única. Entonces por el axioma del buen orden existe un entero positivo mínimo m con esta propiedad. Como u_1 y u_2 están explícitamente definidos, m no es 1 o 2 y la ecuación $u_m = u_{m-1} + u_{m-2}$ es aplicable. Por la definición de m , u_{m-1} y u_{m-2} están definidos de manera única, y la ecuación nos da un valor único para u_m , contrariamente a la hipótesis. La contradicción surge de suponer que no está bien definido para algún n , y por lo tanto esta suposición debe ser falsa.

El lector no debe desanimarse por el uso de argumentos tan retorcidos para establecer algo que es “obviamente” verdadero. En primer lugar, no debemos usar resultados ilegítimamente (sin demostrarlos), y en segundo lugar, el hecho de que el resultado sea “obvio” simplemente indica que estamos trabajando con la correcta representación mental de \mathbb{N} y \mathbb{Z} . Una vez que hemos establecido esa representación sobre bases firmes podemos empezar a extendernos y obtener resultados que no sean tan “obvios”.

El método de definición recursiva aparecerá bastante seguido en el resto del apunte. Existen otras formas de este procedimiento que se “esconden” por su notación. ¿Qué significan las siguientes expresiones?

$$\sum_{r=1}^n 2r - 1, \quad 1 + 3 + 5 + \cdots + (2n - 1).$$

Claramente no basta decir que uno significa lo mismo que el otro, porque cada uno contiene un misterioso símbolo, \sum y \cdots , respectivamente. Lo que deberíamos decir es que cada uno de ellos es equivalente a la expresión s_n , dada por la siguiente definición recursiva:

$$s_1 = 1, \quad s_n = s_{n-1} + (2n - 1), \quad n \geq 2.$$

Esto hace ver claro que ambos símbolos misteriosos son, en realidad, una forma de acortar una definición recursiva, y que por lo tanto son expresiones definidas para todo n en \mathbb{N} .

Ideas similares pueden aplicarse a la definición de productos tal como $n!$ (que se lee *n factorial*). Si decimos que

$$n! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdots n,$$

el significado es bastante claro para cualquiera. Pero para precisar (y hacerlo claro para una computadora) debemos usar las definiciones recursivas.

Definición 1.3.1. Sea $n \in \mathbb{N}$ sean a_i para $1 \leq i \leq n$, una secuencia de números (enteros, reales, etc.). Entonces $\sum_{i=1}^n a_i$ denota la función recursiva definida

$$\sum_{i=1}^1 a_i = a_1, \quad \sum_{i=1}^n a_i = \sum_{i=1}^{n-1} a_i + a_n \quad (n \geq 2).$$

En este caso decimos que $\sum_{i=1}^n a_i$ es la *sumatoria* de los a_i de $i = 1$ a n . El símbolo $\prod_{i=1}^n a_i$ denota la función recursiva definida

$$\prod_{i=1}^1 a_i = a_1, \quad \prod_{i=1}^n a_i = \prod_{i=1}^{n-1} a_i \cdot a_n \quad (n \geq 2).$$

En este caso decimos que $\prod_{i=1}^n a_i$ es la *productoria* de los a_i de $i = 1$ a n .

En el caso de $n!$ se puede o bien definir como $\prod_{i=1}^n i$, o bien como

$$1! = 1, \quad n! = n \cdot (n-1)! \quad (n \geq 2).$$

Otro caso que debemos mencionar es el de la definición de “ n -ésima potencia”: sea x un número, si $n \in \mathbb{N}$ definimos

$$x^1 = x, \quad x^n = x \cdot x^{n-1} \quad (n \geq 2).$$

Por completitud, definimos $x^0 = 1$.

§ Ejercicios

- 1) En el caso siguiente calcule (donde sea posible) los valores de u_1 , u_2 , u_3 y u_4 dados por las ecuaciones. Si no puede calcular los valores explicar porque la definición no esta bien.

$$a) \quad u_1 = 1, \quad u_2 = 1, \quad u_n = u_{n-1} + 2u_{n-2}, \quad n \geq 3.$$

$$b) \quad u_1 = 1, \quad u_n = u_{n-1} + 2u_{n-2}, \quad n \geq 2.$$

$$c) \quad u_1 = 0, \quad u_n = nu_{n-1}, \quad n \geq 2.$$

- 2) Sea u_n definido por las ecuaciones

$$u_1 = 2, \quad u_n = 2^{u_{n-1}}, \quad n \geq 2.$$

¿Cuál es el primer valor de n para el cual no se puede calcular u_n usando una calculadora de bolsillo o de su celular?

- 3) Escribir fórmulas explícitas para las expresiones u_n definidas por las siguientes ecuaciones.

$$a) \quad u_1 = 1, \quad u_n = u_{n-1} + 3, \quad n \geq 2.$$

$$b) \quad u_1 = 1, \quad u_n = n^2 u_{n-1}, \quad n \geq 2.$$

1.4 EL PRINCIPIO DE INDUCCIÓN

Supongamos que nos piden que demos demos el resultado

$$1 + 3 + 5 + \cdots + (2n - 1) = n^2.$$

En otras palabras, debemos demostrar que la expresión de la izquierda definida recursivamente es igual a la expresión definida explícitamente por la fórmula de la derecha, para todos los enteros positivos n . Podemos proceder como sigue.

La fórmula es ciertamente correcta cuando $n = 1$ puesto que $1 = 1^2$. Supongamos que es correcta para un valor específico de n , digamos para $n = k$, de modo que

$$1 + 3 + 5 + \cdots + (2k - 1) = k^2.$$

Podemos usar esto para simplificar la expresión definida recursivamente a la izquierda cuando n es igual a $k + 1$,

$$\begin{aligned} 1 + 3 + 5 + \cdots + (2k + 1) &= 1 + 3 + 5 + \cdots + (2k - 1) + (2k + 1) \\ &= k^2 + (2k + 1) \\ &= (k + 1)^2. \end{aligned}$$

Por lo tanto si el resultado es correcto cuando $n = k$, entonces lo es cuando $n = k + 1$. Se comienza observando que si es correcto cuando $n = 1$, debe ser por lo tanto correcto cuando $n = 2$. Con el mismo argumento como es correcto cuando $n = 2$ debe serlo cuando $n = 3$. Continuando de esta forma veremos que es correcto para todos los enteros positivos n .

La esencia de este argumento es comúnmente llamada *principio de inducción*. Es una técnica poderosa, fácil de aplicar y la aplicaremos frecuentemente. Pero primero debemos examinar sus bases lógicas y para hacerlo necesitamos una formulación más general.

Supongamos que queremos demostrar que un resultado es verdadero para todo $n \in \mathbb{N}$. Con S denotemos al subconjunto de \mathbb{N} para el cual el resultado es correcto: por supuesto, nuestra intención es probar que S es todo \mathbb{N} . El primer paso es probar que 1 pertenece a S , y luego demostraremos que si k pertenece a S , también $k + 1$. Entonces lo pensamos paso a paso, un procedimiento infinito, y concluimos que $S = \mathbb{N}$. Afortunadamente el pensarlo paso a paso no es esencial debido a que el principio de inducción es consecuencia de los axiomas que elegimos tan cuidadosamente para \mathbb{Z} y \mathbb{N} . Más específicamente es consecuencia del axioma del buen orden.

Teorema 1.4.1 (Principio de inducción). *Supongamos que S es un subconjunto de \mathbb{N} que satisface las condiciones*

$$a) 1 \in S,$$

$$b) \text{ para cada } k \in \mathbb{N}, \text{ si } k \in S \text{ entonces } k + 1 \in S.$$

Entonces se sigue que $S = \mathbb{N}$.

Demostración. Si la conclusión es falsa, $S \neq \mathbb{N}$ y el conjunto complementario S^c definido por

$$S^c = \{r \in \mathbb{N} | r \notin S\}$$

es no vacío. Por el axioma del buen orden, S^c tiene un menor elemento m . Como por *a)* el 1 pertenece a S , $m \neq 1$. Se sigue que $m - 1$ pertenece a \mathbb{N} y como m es el mínimo de S^c , $m - 1$ debe pertenecer a S . Poniendo $k = m - 1$ en la condición *b)*, concluimos que m está en S , lo cual contradice el hecho de que m pertenece a S^c . De este modo, la suposición $S \neq \mathbb{N}$ nos lleva a un absurdo, y por lo tanto tenemos $S = \mathbb{N}$. \square

En la práctica, generalmente presentamos una “demostración por inducción” en términos más descriptivos. El hecho de que el resultado es verdadero cuando $n = 1$ se llama *base de la inducción* o *caso base*, *b)* del teorema 1.4.1 es llamado el *paso inductivo* y la suposición de que es verdadero cuando $n = k$ es llamada *hipótesis inductiva*. Cuando se utilizan estos términos, no es necesario introducir explícitamente el conjunto S .

El principio de inducción es útil para probar la veracidad de propiedades relativas a los números naturales. Por ejemplo, consideremos las siguientes propiedades $P(n)$, $Q(n)$ y $R(n)$:

$$a) P(n) \text{ es la propiedad: } 2n - 1 < n^2 + 1,$$

$$b) Q(n) \text{ es la afirmación: si } n \text{ es par entonces } n \text{ es divisible por } 4,$$

$$c) R(n) \text{ es la afirmación: } 2n < n - 1.$$

Intuitivamente notamos que $P(n)$ es verdadera para cualquier n natural, $Q(n)$ lo es para algunos valores de n y es falsa para otros y $R(n)$ es falsa para todo valor de n . Sin embargo, para verificar realmente que la propiedad $P(n)$ es verdadera para todo n natural no podemos hacerlo probando para cada n en particular. Resulta entonces muy útil la siguiente versión equivalente del principio de inducción.

Teorema 1.4.2. Sea $P(n)$ una propiedad para $n \in \mathbb{N}$ tal que:

$$a) P(1) \text{ es verdadera.}$$

$$b) \text{ Para todo } k \in \mathbb{N}, P(k) \text{ verdadera implica } P(k + 1) \text{ verdadera.}$$

Entonces $P(n)$ es verdadera para todo $n \in \mathbb{N}$.

Demostración. Basta tomar

$$S = \{n \in \mathbb{N} | P(n) \text{ es verdadera}\}.$$

Entonces S es un subconjunto de \mathbb{N} y las condiciones *a)* y *b)* nos dicen que $1 \in S$ y si $k \in S$ entonces $k + 1 \in S$. Por el teorema 1.4.1 se sigue que $S = \mathbb{N}$, es decir que $P(n)$ es verdadera para todo n . natural. \square

En la notación del teorema anterior, *a)* es llamado el *caso base*, *b)* es llamado el *paso inductivo* y $P(k)$ es llamada la *hipótesis inductiva*. El paso inductivo consiste en probar que $P(k) \Rightarrow P(k + 1)$ o, equivalentemente, podemos suponer $P(k)$ verdadera y a partir de ella probar $P(k + 1)$.

Ejemplo 1.4.3. Sea $a \in \mathbb{Z}$ tal que $0 < a$. Probemos que $0 < a^n$ para todo $n \in \mathbb{N}$.

Demostración.

(*Caso base*) El resultado es verdadero cuando $n = 1$ pues $0 < a = a^1$.

(*Paso inductivo*) Supongamos que el resultado verdadero cuando $n = k$, o sea, que la hipótesis inductiva es $0 < a^k$. Entonces, como $0 < a$, multiplicando por a ambos lados de la desigualdad obtenemos, por la compatibilidad de $<$ con el producto, que $a \cdot 0 < a^k \cdot a$, es decir $0 < a^{k+1}$. Luego el resultado es verdadero cuando $n = k + 1$ y por el principio de inducción, es verdadero para todos los enteros positivos n . \square

Ejemplo. El entero x_n está definido recursivamente por

$$x_1 = 2, \quad x_n = x_{n-1} + 2n, \quad n \geq 2.$$

Demostremos que

$$x_n = n(n + 1) \quad \text{para todo } n \in \mathbb{N}.$$

Demostración.

(*Caso base*) El resultado es verdadero cuando $n = 1$ pues $2 = 1 \cdot 2$.

(*Paso inductivo*) Supongamos que el resultado verdadero cuando $n = k$, o sea, que la hipótesis inductiva es $x_k = k(k + 1)$. Entonces

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= x_k + 2(k + 1) && \text{(por la definición recursiva)} \\ &= k(k + 1) + 2(k + 1) && \text{(por hipótesis inductiva)} \\ &= (k + 1)(k + 2). && \text{(propiedad distributiva)} \end{aligned}$$

Luego el resultado es verdadero cuando $n = k + 1$ y por el principio de inducción, es verdadero para todos los enteros positivos n . \square

Existen varias formas modificadas del principio de inducción. A veces es conveniente tomar como base inductiva el valor $n = 0$, por otro lado puede ser apropiado tomar un valor como 2 o 3 porque los primeros casos pueden ser excepcionales. Cada problema debe ser tratado según sus características. Otra modificación útil es tomar como hipótesis inductiva la suposición de que el resultado es verdadero para todos los valores $n \leq k$, más que para $n = k$ solamente. Esta formulación es llamada *el principio de inducción completa*. Todas esas modificaciones pueden justificarse con cambios triviales en la demostración del teorema 1.4.1

El siguiente teorema incorpora todas las modificaciones del principio de inducción mencionadas más arriba.

Teorema 1.4.4 (Principio de inducción completa). *Supongamos que n_0 es cualquier entero (no necesariamente positivo), y sea $\mathbb{Z}_{\geq n_0}$ el conjunto de enteros n tal que $n \geq n_0$. Sea S un subconjunto de $\mathbb{Z}_{\geq n_0}$ que satisface las condiciones:*

- a) $n_0 \in S$,
- b) si $h \in S$ para todo h en el rango $n_0 \leq h \leq k$ entonces $k + 1 \in S$.

Entonces se sigue que $S = \mathbb{Z}_{\geq n_0}$.

Demostración ().* Si la conclusión es falsa, $S \neq \mathbb{Z}_{\geq n_0}$ y el conjunto complementario (en X) S^c definido por

$$S^c = \{r \in \mathbb{Z}_{\geq n_0} | r \notin S\}$$

es no vacío. Como $\mathbb{Z}_{\geq n_0}$ es un conjunto acotado inferiormente por n_0 , por el axioma del buen orden, S^c tiene un menor elemento m . Como n_0 pertenece a S , $m \neq n_0$. Se sigue que $m - 1$ pertenece a X y como m es el mínimo de S^c , $m - 1$ debe pertenecer a S . Poniendo $k = m - 1$ en la condición b), concluimos que m está en S , lo cual contradice el hecho de que m pertenece a S^c . De este modo, la suposición $S \neq \mathbb{Z}_{\geq n_0}$ nos lleva a un absurdo, y por lo tanto tenemos $S = \mathbb{Z}_{\geq n_0}$. \square

Como se podrá observar, la demostración es muy similar a la del teorema 1.4.1. El teorema anterior lo podemos utilizar para la demostración de propiedades dependientes de números enteros.

Teorema 1.4.5. *Sea n_0 número entero y sea $P(n)$ una propiedad para $n \geq n_0$ tal que:*

- a) $P(n_0)$ es verdadera.
- b) Si $P(h)$ verdadera para toda h tal que $n_0 \leq h \leq k$ implica $P(k + 1)$ verdadera.

Entonces $P(n)$ es verdadera para todo $n \geq n_0$.

Demostración. Ejercicio. □

Ejemplo. Sean

$$u_1 = 3, \quad u_2 = 5, \quad u_n = 3u_{n-1} - 2u_{n-2}, \quad n \geq 3.$$

Probemos que $u_n = 2^n + 1$, para todo $n \in \mathbb{N}$.

Solución. Aquí usaremos una extensión natural del principio de inducción: en este caso, el caso base es $n = 1$ y $n = 2$.

(Caso base) El resultado es verdadero cuando $n = 1$ pues $3 = 2^1 + 1$ y para $n = 2$ pues $5 = 2^2 + 1$.

(Paso inductivo) Supongamos que $k \geq 2$ y el resultado es cierto para los h tales que $1 \leq h \leq k$. Es decir que $u_h = 2^h + 1$ para $1 \leq h \leq k$ y $k \geq 2$ (hipótesis inductiva), entonces

$$\begin{aligned} u_{k+1} &= 3u_k - 2u_{k-1} && \text{(por definición recursiva)} \\ &= 3(2^k + 1) - 2(2^{k-1} + 1) && \text{(por hipótesis inductiva)} \\ &= 3 \cdot 2^k + 3 - 2 \cdot 2^{k-1} - 2 \\ &= 3 \cdot 2^k + 1 - 2^k \\ &= 2 \cdot 2^k + 1 \\ &= 2^{k+1} + 1. \end{aligned}$$

□

Ejemplo. Sea $a \in \mathbb{Z}$ y $n \in \mathbb{N}$. Definimos a^n de la siguiente manera:

$$a^1 = a, \quad a^{n+1} = a^n \cdot a \quad \text{para } n > 1. \quad (1.4.1)$$

Si $n, m \in \mathbb{N}$ verifiquemos las siguientes propiedades

a) $a^n \cdot a^m = a^{n+m}.$

b) $(a^n)^m = a^{nm}$

Solución. Veamos la afirmación a). Se fijará n y se hará inducción sobre m .

(Caso base) Debemos ver que $a^n \cdot a^1 = a^{n+1}$, lo cual es verdadero por la definición recursiva (1.4.1).

(Paso inductivo) Supongamos que el resultado es verdadero para $m = k$, es decir que $a^n \cdot a^k = a^{n+k}$ (hipótesis inductiva). Veamos que $a^n \cdot a^{k+1} = a^{n+k+1}$. Ahora bien,

$$\begin{aligned} a^n \cdot a^{k+1} &= a^n \cdot a^k \cdot a && \text{(definición (1.4.1))} \\ &= a^{n+k} \cdot a && \text{(hipótesis inductiva)} \\ &= a^{n+k+1} && \text{(definición (1.4.1)).} \end{aligned}$$

Probemos ahora *b*). Al igual que antes, Se fijará n y se hará inducción sobre m .

(Caso base) Debemos ver que $(a^n)^1 = a^n$, lo cual es verdadero por la definición recursiva (1.4.1).

(Paso inductivo) Supongamos que el resultado es verdadero para $m = k$, es decir que $(a^n)^k = a^{nk}$ (hipótesis inductiva). Veamos que $(a^n)^{k+1} = a^{n(k+1)}$.

$$\begin{aligned} (a^n)^{k+1} &= (a^n)^k \cdot a^n && \text{(definición (1.4.1))} \\ &= a^{nk} \cdot a^n && \text{(hipótesis inductiva)} \\ &= a^{nk+n} && \text{(por a)} \\ &= a^{n(k+1)}. \end{aligned}$$

□

§ Ejercicios

- 1) Usar el principio de inducción para demostrar que

$$1^2 + 2^2 + \cdots + n^2 = \frac{1}{6}n(n+1)(2n+1)$$

para todos los enteros positivos n .

- 2) Hacer una tabla de valores de

$$S_n = 1^3 + 2^3 + \cdots + n^3$$

para $1 \leq n \leq 6$. Basándose en su tabla sugiera una fórmula para S_n . [Ayuda: los valores de S_n son cuadrados perfectos.] Usar el principio de inducción para establecer que la fórmula es correcta para todo $n \geq 1$. (Si el método falla ¡su fórmula es equivocada!)

- 3) Probar que

$$1^4 + 2^4 + \cdots + n^4 = \frac{1}{30}n(n+1)(2n+1)(3n^2+3n-1).$$

- 4) Usar el principio de inducción para probar que $2^n > n+1$ para todo entero $n \geq 2$.
- 5) Encontrar el menor entero positivo n_0 para el cual sea verdadero que $n! \geq 2^n$. Tomando el caso $n = n_0$ como la base inductiva, demostrar que el resultado vale para $n \geq n_0$.
- 6) En los siguientes casos encontrar los valores apropiados de n_0 para la base inductiva y demostrar que la afirmación es verdadera para todos los $n \geq n_0$.

$$a) \ n^2 + 6n + 9 \geq 0,$$

$$b) \ n^3 \geq 6n^2.$$

CONTEO

Intuitivamente, diremos que un conjunto A es finito si podemos contar la cantidad de elementos que tiene. En ese caso denotaremos $|A|$ la cantidad de elementos de A y la llamaremos el *cardinal de A* .

Formalmente, un conjunto A es finito y tiene cardinal n si existe una función $f : \{1, \dots, n\} \rightarrow A$ biyectiva. Sin embargo, a lo largo del curso usaremos sólo la definición intuitiva y no formal de cardinal, más que suficiente para aprender los principios básicos de conteo.

2.1 PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONTEO

El principio de adición

Se puede realizar una acción X de n formas distintas o, alternativamente, se puede realizar otra acción Y de m formas distintas. Entonces el número de formas de realizar la acción “ X o Y ” es $n + m$.

Ejemplo 2.1.1. Supongamos que una persona va a salir a pasear y puede ir al cine donde hay 3 películas en cartel o al teatro donde hay 4 obras posibles. Entonces, tendrá un total de $3 + 4 = 7$ formas distintas de elegir el paseo.

Este principio es el más básico del conteo y más formalmente dice que si A y B son conjuntos finitos disjuntos, entonces

$$|A \cup B| = |A| + |B|.$$

El principio es fácilmente generalizable a varios conjuntos.

Proposición 2.1.2. Sean A_1, \dots, A_n conjuntos finitos tal que $A_i \cap A_j = \emptyset$ cuando $i \neq j$, entonces

$$|A_1 \cup \dots \cup A_n| = |A_1| + \dots + |A_n|.$$

Demostración. La prueba se hace por inducción en n . Debemos probar

$$P(n) = \text{Si } A_1, \dots, A_n \text{ conjuntos finitos disjuntos dos a dos, entonces} \\ |A_1 \cup \dots \cup A_n| = |A_1| + \dots + |A_n|.$$

(Caso base $n = 1$) En este caso no hay nada que probar pues $|A_1| = |A_1|$.

(Paso inductivo) La hipótesis inductiva es $P(k)$ y debemos probar que $P(k) \Rightarrow P(k+1)$. Si denotamos $B = A_1 \cup \dots \cup A_k$, entonces

$$A_1 \cup \dots \cup A_{k+1} = B \cup A_{k+1}$$

Ahora bien, si $x \in B \cap A_{k+1}$, entonces $x \in A_i$ para algún $i < k+1$ y $x \in A_{k+1}$. Como $A_i \cap A_{k+1} = \emptyset$, se produce un absurdo que viene de suponer que existía un elemento en $B \cap A_{k+1}$. Luego $B \cap A_{k+1} = \emptyset$ y por el principio de adición $|B \cup A_{k+1}| = |B| + |A_{k+1}|$.

Por la hipótesis inductiva tenemos que

$$|B| = |A_1 \cup \dots \cup A_k| = |A_1| + \dots + |A_k|,$$

Luego

$$|A_1 \cup \dots \cup A_k \cup A_{k+1}| = |B| + |A_{k+1}| = |A_1| + \dots + |A_k| + |A_{k+1}|.$$

□

Si A y B no son disjuntos, cuando sumamos $|A|$ y $|B|$ estamos contando $A \cap B$ dos veces. Entonces, para obtener la respuesta correcta debemos restar $|A \cap B|$ y obtenemos

$$|A \cup B| = |A| + |B| - |A \cap B|.$$

Generalizar la fórmula de arriba a más conjuntos no es del todo sencillo y es el llamado principio del tamiz o principio de inclusión-exclusión (ver apéndice B).

El principio de multiplicación

Suponga que una actividad consiste de 2 etapas y la primera etapa puede ser realizada de n_1 maneras y la etapa 2 puede realizarse de n_2 maneras, independientemente de como se ha hecho la etapa 1. Entonces toda la actividad puede ser realizada de $n_1 \cdot n_2$ formas distintas.

Ejemplo. Supongamos que la persona del ejemplo 2.1.1 tiene suficiente tiempo y dinero para ir primero al cine y luego al teatro. Entonces tendrá $3 \cdot 4 = 12$ formas distintas de hacer el paseo.

Formalmente, si A, B conjuntos y definimos el *producto cartesiano* entre A y B por

$$A \times B = \{(a, b) : a \in A, b \in B\}.$$

Entonces si A y B son conjuntos finitos se cumple que

$$|A \times B| = |A| \cdot |B|.$$

2.2 SELECCIONES ORDENADAS CON REPETICIÓN

Un aplicación inmediata del principio de multiplicación es que nos permite calcular la cantidad de selecciones ordenadas con repetición.

Ejemplo. Sea $X = \{1, 2, 3\}$ ¿de cuántas formas se pueden elegir dos de estos números en forma ordenada? Es decir, debemos elegir dos números a y b teniendo en cuenta que si $a \neq b$ no es lo mismo elegir a y luego b que b y a .

Para no escribir demasiado vamos a adoptar una notación muy conveniente: si elegimos a y b en forma ordenada, denotamos ab . Entonces, en muy breve espacio seremos capaces de escribir todas las selecciones ordenadas de 2 elementos del conjunto $\{1, 2, 3\}$:

11	12	13
21	22	23
31	32	33

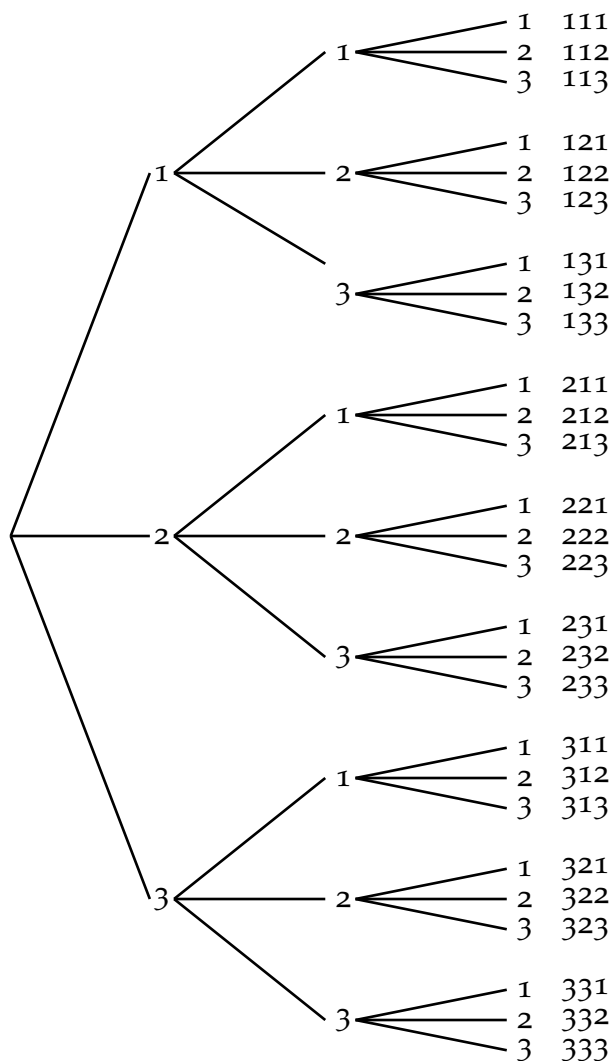
Son $9 = 3^2$ formas. ¿Cómo justificamos esto? Es claro que para la primera elección tenemos 3 valores posibles y para la segunda elección tenemos también 3 valores posibles, entonces, por el principio de multiplicación, tenemos en total $3 \cdot 3$ elecciones posibles.

Avancemos un poco más y ahora elijamos en forma ordenada 3 elementos de $[1, 3]$, es claro que estas elecciones son

111	211	311
112	212	312
113	213	313
121	221	321
122	222	322
123	223	323
131	231	331
132	232	332
133	233	333.

El total de elecciones posibles $27 = 3^3$. Esto se justifica usando dos veces el principio de multiplicación: para la primera elección tenemos 3 valores posibles. Para la segunda elección tenemos también 3 valores posibles, entonces, por el principio de multiplicación, tenemos en total $3 \cdot 3$ valores posibles para la elección de los dos primeros números. Como para la tercera elección tenemos 3 valores posibles, por el principio de multiplicación nuevamente, tenemos $3 \cdot 3 \cdot 3$ elecciones posibles.

Un diagrama arbolado ayuda a pensar.



Cada rama del árbol representa una selección ordenada de elementos de $\{1, 2, 3\}$.

El razonamiento anterior se puede extender:

Proposición 2.2.1. Sean $m, n \in \mathbb{N}$. Hay n^m formas posibles de elegir ordenadamente m elementos de un conjunto de n elementos.

Idea de la prueba. La prueba de esta proposición se basa en aplicar el principio de multiplicación $m - 1$ veces, es decir debemos hacer inducción sobre m y usar el principio de multiplicación en el paso inductivo. \square

Ejemplo. ¿Cuántos números de cuatro dígitos pueden formarse con los dígitos 1, 2, 3, 4, 5, 6?

Por la proposición anterior es claro que hay 6^4 números posibles.

Ejemplo. ¿Cuántos números de 5 dígitos y capicúas pueden formarse con los números dígitos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8? Un número capicúa de cinco dígitos es de la forma

$$xyzyx$$

Se reduce a ver cuántos números de tres dígitos pueden formarse con aquéllos dígitos. Exactamente 8^3 .

Ejemplo. Sea X un conjunto de m elementos. Queremos contar cuántos subconjuntos tiene este conjunto. Por ejemplo, si $X = \{a, b, c\}$ los subconjuntos de X son exactamente

$$\emptyset, \{a\}, \{b\}, \{c\}, \{a, b\}, \{a, c\}, \{b, c\}, \{a, b, c\}.$$

Es decir que existen 8 subconjuntos de X , un conjunto de 3 elementos. ¿Cómo podemos encontrar razonando este número? Una forma sería la siguiente: cuando elijo un subconjunto el a puede estar o no estar en el subconjunto, es decir hay dos posibilidades. Con el b pasa lo mismo, puede estar o no estar y por lo tanto hay 2 posibilidades. Con el c se hace un razonamiento análogo y por lo tanto tenemos que hay en total

$$2 \cdot 2 \cdot 2 = 2^3 = 8$$

posibles subconjuntos de X .

Otra forma de verlo: podemos identificar cada subconjunto de X con una terna ordenada de 0's y 1's de la siguiente manera: si a está en el subconjunto la primera coordenada de la terna es 1, si no es 0; si b está en el subconjunto la segunda coordenada de la terna es 1, si no es 0; si c está en el subconjunto la tercera coordenada de la terna es 1, si no es 0. Es decir tenemos la identificación

\emptyset	\leftrightarrow	000
$\{a\}$	\leftrightarrow	100
$\{b\}$	\leftrightarrow	010
$\{c\}$	\leftrightarrow	001
$\{a, b\}$	\leftrightarrow	110
$\{a, c\}$	\leftrightarrow	101
$\{b, c\}$	\leftrightarrow	011
$\{a, b, c\}$	\leftrightarrow	111.

Observar entonces que seleccionar un subconjunto de X es equivalente a elegir en forma ordenada 3 elementos del conjunto $\{0, 1\}$; y sabemos entonces que en ese caso tenemos 2^3 posibilidades.

En general, cuando X tiene n elementos, elegir un subconjunto de X es equivalente a elegir en forma ordenada n elementos del conjunto $\{0, 1\}$ y por lo tanto

Proposición 2.2.2. La cantidad de subconjuntos de un conjunto de n elementos es 2^n .

Dado X un conjunto, denotamos $\mathcal{P}(X)$ el conjunto formado por todos los subconjuntos de X , por ejemplo

$$\mathcal{P}(\{1, 2\}) = \{\emptyset, \{1\}, \{2\}, \{1, 2\}\}.$$

Si X es un conjunto finito la proposición 2.2.2 nos dice que

$$|\mathcal{P}(X)| = 2^{|X|}$$

2.3 SELECCIONES ORDENADAS SIN REPETICIÓN

Sea $n \in \mathbb{N}$. Recordemos que definimos recursivamente *factorial de n* al número denotado

$$n!,$$

tal que

$$\begin{aligned} 1! &= 1 \\ (n+1)! &= n!(n+1) \end{aligned}$$

Definimos también

$$0! = 1$$

Por ejemplo

$$\begin{aligned} 2! &= 2 \cdot 1 = 2 \\ 3! &= 3 \cdot 2 \cdot 1 = 6 \\ 4! &= 3! \cdot 4 = 6 \cdot 4 = 24. \end{aligned}$$

Si $n \in \mathbb{N}$, denotaremos $[[1, n]]$ al conjunto de los primeros n números naturales. Es decir:

$$[[1, n]] = \{1, 2, \dots, n\}.$$

Ahora estudiaremos las selecciones ordenadas de m elementos entre n donde *no* se permite la repetición. Es decir si el conjunto es $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, las selecciones deben ser del tipo

$$a_{i_1} a_{i_2} \cdots a_{i_m}$$

donde $a_{i_j} \neq a_{i_k}$ si $i \neq k$.

Por ejemplo, las selecciones de 3 elementos en forma ordenada y sin repetición de $[[1, 3]]$ son exactamente

123, 132, 213, 231, 312, 321

(son las ternas donde los tres números son distintos). O sea hay 6 selecciones ordenadas y sin repetición de elementos de $[[1, 3]]$.

Notemos que

$$3 \cdot 2 \cdot 1 = 6 = 3!$$

Esta forma de escribir nos da la razón de que haya 6 selecciones ordenadas y sin repetición de elementos de $[[1, 3]]$: para la elección del primer elemento tenemos 3 posibilidades (el 1, 2 o 3). Cuando elegimos el segundo elemento, si queremos que no haya repetición, debemos excluir el valor elegido en primer lugar, o sea que tenemos solo 2 elecciones. Análogamente para la tercera elección solo hay solo una posibilidad, pues debemos descartar los valores elegidos en el primer y segundo lugar. Tenemos entonces $3 \cdot 2 \cdot 1$ selecciones posibles.

En un diagrama arbolado la selección se puede representar de la siguiente forma:



El número total es entonces $3 \cdot 2 \cdot 1 = 6$.

Pensemos ahora que queremos elegir en forma ordenada y sin repetición 3 elementos entre 5. Entonces para la primera elección tenemos 5 posibilidades, para la segunda 4 posibilidades y para la tercera 3 posibilidades haciendo un total de

$$5 \cdot 4 \cdot 3$$

selecciones posibles.

Proposición 2.3.1 (Principio de las casillas). *Si $n < m$, no hay ninguna selección ordenada y sin repetición de m elementos de un conjunto de n elementos.*

El principio de las casillas, también llamado *principio del palomar* o *principio de Dirichlet*, es intuitivamente trivial: si hay más personas que asientos, ¡alguien se quedará parado!. Su demostración no es difícil y se basa en la definición formal de conteo, con el uso de funciones biyectivas e inyectivas.

Proposición 2.3.2. Si $n \geq m$ entonces existen

$$n \cdot (n-1) \cdots (n-(m-1)), \quad m \text{ - factores}$$

selecciones ordenadas y sin repetición de m elementos de un conjunto de n elementos.

Demostración. La prueba es una generalización del razonamiento aplicado más arriba en los ejemplos: debemos seleccionar m -veces elementos de un conjunto que tiene n elementos. La primera selección puede ser de cualquiera de los n objetos; la segunda selección debe recaer en uno de los $n-1$ elementos restantes. De manera similar, hay $n-2$ posibilidades para la tercera selección, y así sucesivamente. Cuando hacemos la m -ésima selección, $m-1$ elementos ya han sido seleccionados, y entonces el elemento seleccionado debe ser uno de los $n-(m-1)$ elementos restantes. Por consiguiente el número total de selecciones es el propuesto. \square

Observación. El resultado anterior en particular nos dice que existen

$$n \cdot (n-1) \cdots (n-(n-1)) = n \cdot (n-1) \cdots 1 = n!$$

selecciones ordenadas y sin repetición de n elementos en un conjunto con n elementos y esta podría ser una motivación natural del factorial.

Las selecciones ordenadas y sin repetición de n elementos en un conjunto con n elementos se denominan *permutaciones* de grado n . Hay, pues, $n!$ permutaciones de grado n .

Volviendo al resultado de la proposición 2.3.2, por ejemplo hay

- $7 \cdot 6 \cdot 5$ selecciones ordenadas y sin repetición de 3 elementos de $[1, 7]$,
- $7 \cdot 6 \cdot 5 \cdot 4 \cdot 3$ selecciones ordenadas y sin repetición de 5 elementos de $[1, 7]$ y
- $7!$ selecciones ordenadas y sin repetición de todos los elementos de $[1, 7]$.

Notemos que si $n \geq m$ entonces

$$n \cdot (n-1) \cdots (n-(m-1)) = \frac{n!}{(n-m)!}$$

pues

$$n! = n \cdot (n-1) \cdots (n-(m-1)) \cdot (n-m)!$$

Por lo tanto la proposición 2.3.2 se puede reescribir de la siguiente manera:

Proposición 2.3.3. Si $n \geq m$ entonces existen

$$\frac{n!}{(n-m)!}$$

selecciones ordenadas y sin repetición de m elementos de un conjunto de n elementos.

Ejemplo. Si en un colectivo hay 10 asientos vacíos. ¿De cuántas formas pueden sentarse 7 personas? Se trata de ver cuantas selecciones ordenadas y sin repetición de 7 asientos entre 10.

Este número es

$$10 \cdot 9 \cdot 8 \cdot 7 \cdot 6 \cdot 5 \cdot 4, \quad 7 - \text{factores.}$$

Ejemplo. ¿Cuántas permutaciones pueden formarse con las letras de *silvia*?

Afirmamos que se pueden formar $\frac{6!}{2!}$ palabras usando las letras de *silvia*.

Si escribo en lugar de *silvia*,

$$s i l v i' a$$

Es decir si cambio la segunda i por i' , todas las letras son distintas, luego hay $6!$ permutaciones, pero cada par de permutaciones del tipo

$$\begin{array}{c} \dots i \dots i' \dots \\ \dots i' \dots i \dots \end{array}$$

coinciden, por lo tanto tengo que dividir por 2 el número total de permutaciones.

Tomemos la palabra

$$\text{ramanathan}$$

el número total de permutaciones es $\frac{10!}{4!2!}$.

En efecto, escribiendo el nombre anterior así

$$r a_1 m a_2 n_1 a_3 t h a_4 n_1$$

el número total de permutaciones es $10!$. Pero permutando las a_i y las n_i sin mover las otras letras obtenemos la misma permutación de *ramanathan*.

Como hay $4!$ permutaciones de las letras a_1, a_2, a_3, a_4 , y $2!$ de n_1, n_2 el número buscado es

$$\frac{10!}{4!2!}.$$

Dejamos a cargo del lector probar que el número total de permutaciones de las letras de *arrivederci* es

$$\frac{11!}{3!2!2!}$$

§ Ejercicios

1) Simplificar las siguientes expresiones, sea $n \in \mathbb{N}$

$$a) \frac{n!}{(n-2)!}, \text{ si } n \geq 2. \qquad b) \frac{(n+2)!}{(n-2)!}, \text{ si } n \geq 2.$$

$$c) \frac{n!}{(n-2)!2!}, \text{ si } n \geq 2. \qquad d) \frac{(n+2)!}{n!}.$$

$$e) \frac{(n-1)!}{(n+2)!}.$$

2) En este ejercicio decimos que una *palabra* es una sucesión de letras (tenga sentido o no).

a) ¿Cuántas palabras de 4 letras o menos se pueden hacer con un alfabeto de 26 letras?

b) ¿De cuántas formas pueden ordenarse las letras de la palabra PREPOTENTE?

2.4 SELECCIONES SIN ORDEN

Consideremos un conjunto X finito de n elementos. Nos proponemos averiguar cuántos subconjuntos de m elementos hay en X .

Ejemplo. Por ejemplo, sea $X = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ y nos interesan los subconjuntos de tres elementos. ¿Cuántos habrá? Una forma de individualizar un subconjunto de tres elementos en X , consiste en, primero, seleccionar ordenadamente 3 elementos de $[[1, 5]]$.

Habría, a priori, $5 \cdot 4 \cdot 3$ subconjuntos pues ese es el número de selecciones ordenadas y sin repetición de 3 elementos de $[[1, 5]]$.

Pero es claro que algunas de las selecciones ordenadas pueden determinar el mismo subconjunto. En efecto, por ejemplo, cualesquiera de las selecciones

$$123, \quad 132, \quad 213, \quad 231, \quad 312, \quad 321$$

determina el subconjunto $\{1, 2, 3\}$. Es decir las permutaciones de $\{1, 2, 3\}$ determinan el mismo subconjunto. Y así con cualquier otro subconjunto de tres elementos. Por lo tanto, el número total de subconjuntos de 3 elementos debe ser

$$\frac{5 \cdot 4 \cdot 3}{3!} = \frac{5!}{3!(5-3)!}$$

En el caso general de subconjuntos de m elementos de un conjunto de n elementos ($m \leq n$) podemos razonar en forma análoga. Cada subconjunto de m elementos está determinado por una selección ordenada y todas las permutaciones de esta selección.

Por lo tanto el número total de subconjunto de m elementos de X es

$$\frac{n \cdot (n-1) \cdots (n-(m-1))}{m!} = \frac{n!}{(n-m)! m!}$$

Definición 2.4.1. Sean $n, m \in \mathbb{N}_0$, $m \leq n$. Definimos

$$\binom{n}{m} = \frac{n!}{(n-m)! m!}$$

y por razones que se verán más adelante se denomina el *coeficiente binomial* o *número combinatorio* asociado al par n, m con $m \leq n$.

Definimos también

$$\binom{n}{m} = 0, \quad \text{si } m > n.$$

Observación. Hay unos pocos números combinatorios que son fácilmente calculables:

$$\binom{n}{0} = \binom{0}{0} = 1 \quad \text{y} \quad \binom{n}{1} = \binom{n}{n-1} = n.$$

Estos resultados se obtienen por aplicación directa de la definición (recordar que $0! = 1$).

Concluyendo, el razonamiento de la página 35 se puede resumir en la siguiente proposición.

Proposición 2.4.2. Sean $n, m \in \mathbb{N}_0$, $m \leq n$, y supongamos que el conjunto X tiene n elementos.

Entonces, la cantidad de subconjuntos de X con m elementos es $\binom{n}{m}$.

Como vimos anteriormente el número combinatorio suele resultar de utilidad para resolver problemas de conteo. Veamos un ejemplo.

Ejemplo. ¿Cuántos comités pueden formarse de un conjunto de 6 mujeres y 4 hombres, si el comité debe estar compuesto por 4 mujeres y 2 hombres?

Solución. Debemos elegir 4 mujeres entre 6, y la cantidad de elecciones posibles es $\binom{6}{4}$. Por otro lado, hay $\binom{4}{2}$ formas de elegir 2 hombres entre 4. Luego, por el principio de multiplicación, el resultado es

$$\binom{6}{4} \cdot \binom{4}{2} = \frac{6!}{2!4!} \cdot \frac{4!}{2!2!} = \frac{6 \cdot 5}{2} \cdot \frac{4 \cdot 3}{2} = 15 \cdot 6 = 90.$$

□

Proposición 2.4.3 (Simetría del número combinatorio). Sean $m, n \in \mathbb{N}_0$, tal que $m \leq n$. Entonces

$$\binom{n}{m} = \binom{n}{n-m}.$$

Demostración.

$$\binom{n}{n-m} = \frac{n!}{(n-(n-m))!(n-m)!} = \frac{n!}{m!(n-m)!} = \frac{n!}{(n-m)!m!} = \binom{n}{m}.$$

□

Observación. El hecho de que

$$\binom{n}{m} = \binom{n}{n-m}.$$

se puede interpretar en términos de subconjuntos: $\binom{n}{m}$ es el número de subconjuntos de m elementos de un conjunto de n elementos. Puesto que con cada subconjunto de m elementos hay unívocamente asociado un subconjunto de $n-m$ elementos, su complemento en X , es claro que

$$\binom{n}{m} = \binom{n}{n-m}.$$

Teorema 2.4.4 (Fórmula del triángulo de Pascal). Sean $m, n \in \mathbb{N}$, tal que $m \leq n$. Entonces

$$\binom{n+1}{m} = \binom{n}{m-1} + \binom{n}{m}$$

Demostración. El enunciado nos dice que debemos demostrar que

$$\frac{(n+1)!}{(n-m+1)!m!} = \frac{n!}{(n-m+1)!(m-1)!} + \frac{n!}{(n-m)!m!}$$

Hay varias forma de operar algebraicamente las expresiones y obtener el resultado. Nosotros partiremos de la expresión de la derecha y obtendremos la de la izquierda:

$$\begin{aligned} \frac{n!}{(n-m+1)!(m-1)!} + \frac{n!}{(n-m)!m!} &= \\ &= \frac{n!}{(n-m)!(m-1)!} \left(\frac{1}{(n-m+1)} + \frac{1}{m} \right) \\ &= \frac{n!}{(n-m)!(m-1)!} \left(\frac{m+n-m+1}{(n-m+1)m} \right) \\ &= \frac{n!}{(n-m)!(m-1)!} \left(\frac{n+1}{(n-m+1)m} \right) \\ &= \frac{n!(n+1)}{(n-m)!(n-m+1)(m-1)!m} \\ &= \frac{(n+1)!}{(n-m+1)!m!}. \end{aligned}$$

□

Aunque por razones de conteo es obvio que los números combinatorios son números naturales, esto no es claro por la definición formal.

Corolario 2.4.5. Si $n \in \mathbb{N}$ y $0 \leq m \leq n$ entonces $\binom{n}{m} \in \mathbb{N}$.

Demostración. Haremos inducción en n . Si $n = 1$ los posibles números combinatorios son

$$\binom{1}{1} = \binom{1}{0} = 1 \in \mathbb{N}.$$

Ahora supongamos que el resultado sea cierto para $n \in \mathbb{N}$. Es decir, $\binom{n}{m} \in \mathbb{N}$ cualquiera sea m tal que $0 \leq m \leq n$ (hipótesis inductiva).

Probaremos entonces que

$$\binom{n+1}{m} \in \mathbb{N}$$

para todo $m \in \mathbb{N}$ tal que $0 \leq m \leq n+1$.

Consideremos tres casos: $m = 0$, $1 \leq m \leq n$ y $m = n + 1$.

Si $m = 0$, entonces

$$\binom{n+1}{m} = \binom{n+1}{0} = 1 \in \mathbb{N}.$$

Si $1 \leq m \leq n$, entonces por el teorema anterior (en la segunda parte)

$$\binom{n+1}{m} = \binom{n}{m-1} + \binom{n}{m}$$

Como $\binom{n}{m-1}$ y $\binom{n}{m}$ pertenecen a \mathbb{N} por la hipótesis inductiva, su suma es también un número natural, o sea

$$\binom{n+1}{m} \in \mathbb{N}$$

para $1 \leq m \leq n$.

Si $m = n + 1$, entonces

$$\binom{n+1}{n+1} = 1 \in \mathbb{N}.$$

Por lo anterior, se concluye que

$$\binom{n+1}{m} \in \mathbb{N}$$

cualquiera sea m , $0 \leq m \leq n + 1$.

Por lo tanto, es válido el paso inductivo y así nuestra afirmación queda probada. \square

El teorema precedente permite calcular los coeficientes binomiales inductivamente. Escribamos en forma de triángulo

$$\begin{array}{ccccccc}
 & & & & \binom{0}{0} & & & \\
 & & & & \binom{1}{0} & & \binom{1}{1} & \\
 & & & \binom{2}{0} & & \binom{2}{1} & & \binom{2}{2} \\
 & & \binom{3}{0} & & \binom{3}{1} & & \binom{3}{2} & & \binom{3}{3} \\
 \binom{4}{0} & & \binom{4}{1} & & \binom{4}{2} & & \binom{4}{3} & & \binom{4}{4} \\
 \cdot & & \cdot & & \cdot & & \cdot & & \cdot
 \end{array}$$

En virtud del teorema 2.4.4 cada término interior es suma de los dos términos inmediatos superiores. Los elementos en los lados valen 1 por lo tanto se puede calcular cualquiera de ellos.

				1				
				1		1		
			1		2		1	
		1		3		3		1
	1		4		6		4	
		1		6		4		1
			1		4		1	
				1				

(Lector: calcule el valor de la suma total de cada fila del triángulo.)

El triángulo es denominado *triángulo de Pascal*. Entre las propiedades que cuenta el triángulo de Pascal está la de ser simétrico respecto de su altura, como consecuencia de la simetría de los números combinatorios (ver proposición 2.4.3).

2.5 EL TEOREMA DEL BINOMIO

En álgebra elemental aprendemos las formulas

$$(a + b)^2 = a^2 + 2ab + b^2, \quad (a + b)^3 = a^3 + 3a^2b + 3ab^2 + b^3,$$

y a veces nos piden desarrollar la formula para $(a + b)^4$ y potencias mayores de $a + b$. El resultado general que da una formula para $(a + b)^n$ es conocido como el *teorema del binomio*.

Teorema 2.5.1. Sea n un entero positivo. El coeficiente del termino $a^{n-r}b^r$ en el desarrollo de $(a + b)^n$ es el número binomial $\binom{n}{r}$. Explícitamente,

$$(a + b)^n = \binom{n}{0}a^n + \binom{n}{1}a^{n-1}b + \binom{n}{2}a^{n-2}b^2 + \cdots + \binom{n}{n}b^n,$$

o, escrito en forma más concisa,

$$(a + b)^n = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} a^{n-i} b^i. \quad (2.5.1)$$

Demostración. (Primera) Consideremos que ocurre cuando multiplicamos n factores: $(a + b)(a + b) \cdots (a + b)$.

Un término en el producto se obtiene seleccionando o bien a o bien b de cada factor. El número de términos $a^{n-r}b^r$ es solo el número de formas de

seleccionar r b's (y consecuentemente $n - r$ a's), y por definición éste es el número binomial $\binom{n}{r}$. \square

Observación 2.5.2. Antes de hacer una segunda demostración del teorema del binomio veamos el siguiente resultado que nos resultará útil: sea $a_k, a_{k+1}, \dots, a_{m-1}, a_m$ una sucesión de números reales ($k \leq m$) y sea $r \in \mathbb{N}_0$. Entonces

$$\sum_{i=k}^m a_i = \sum_{i=r}^{m-k+r} a_{i+k-r}.$$

La sumatoria de la derecha es la de la izquierda con un “cambio de variable” en el índice. La demostración de este hecho se puede hacer por inducción sobre m (caso base $m = k$) o simplemente escribiendo ambas sumatorias con la notación de puntos suspensivos y verificando que ambas son iguales a

$$a_k + a_{k+1} + \dots + a_{m-1} + a_m.$$

Observación. Por la simetría del número binomial la fórmula (2.5.1) es equivalente a

$$(a + b)^n = \sum_{i=0}^n \binom{n}{n-i} a^{n-i} b^i.$$

Haciendo el cambio de variable $i \leftrightarrow n - i$, se obtiene la fórmula equivalente

$$(a + b)^n = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} a^i b^{n-i}.$$

La fórmula anterior es también, muy utilizada para enunciar el teorema del binomio.

Demostración ().* (Segunda) Se hace por inducción en n . Si $n = 1$, el resultado es trivial. Supongamos que el resultado es cierto para $n - 1$, es decir, de acuerdo a la fórmula (2.5.1),

$$(a + b)^{n-1} = \sum_{i=0}^{n-1} \binom{n-1}{i} a^{n-1-i} b^i.$$

Luego

$$\begin{aligned}
(a+b)^n &= (a+b)(a+b)^{n-1} \\
&= (a+b) \left(\sum_{i=0}^{n-1} \binom{n-1}{i} a^{n-1-i} b^i \right) && \text{(hip. ind.)} \\
&= \sum_{i=0}^{n-1} \binom{n-1}{i} a^{n-1-i} b^i + \sum_{i=0}^{n-1} \binom{n-1}{i} a^{n-1-i} b^{i+1} && \text{(distributiva)} \\
&= \sum_{i=0}^{n-1} \binom{n-1}{i} a^{n-1-i} b^i + \sum_{i=1}^n \binom{n-1}{i-1} a^{n-1-i} b^i && \text{(obs. 2.5.2)} \\
&= a^n + \sum_{i=1}^{n-1} \left\{ \binom{n-1}{i} + \binom{n-1}{i-1} \right\} a^{n-1-i} b^i + b^n \\
&= a^n + \sum_{i=1}^{n-1} \binom{n}{i} a^{n-1-i} b^i + b^n && \text{(teor. 2.4.4)} \\
&= \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} a^{n-i} b^i.
\end{aligned}$$

□

Los coeficientes en el desarrollo pueden ser calculados con el método recursivo usado para los números binomiales (triángulo de Pascal) o usando la formula. Por ejemplo,

$$\begin{aligned}
(a+b)^6 &= \binom{6}{0} a^6 + \binom{6}{1} a^5 b + \binom{6}{2} a^4 b^2 + \binom{6}{3} a^3 b^3 \\
&\quad + \binom{6}{4} a^2 b^4 + \binom{6}{5} a b^5 + \binom{6}{6} b^6 \\
&= a^6 + 6a^5 b + 15a^4 b^2 + 20a^3 b^3 + 15a^2 b^4 + 6ab^5 + b^6.
\end{aligned}$$

Por supuesto, podemos obtener otras formulas útiles si reemplazamos a y b por otras expresiones. Algunos ejemplos típicos son:

$$\begin{aligned}
(1+x)^4 &= 1 + 4x + 6x^2 + 4x^3 + x^4; \\
(1-x)^7 &= 1 - 7x + 21x^2 - 35x^3 + 35x^4 - 21x^5 + 7x^6 - x^7; \\
(x+2y)^5 &= x^5 + 10x^4 y + 40x^3 y^2 + 80x^2 y^3 + 80xy^4 + 32y^5; \\
(x^2+y)^4 &= x^8 + 4x^3 y + 6x^4 y^2 + 4x^2 y^3 + y^4.
\end{aligned}$$

La expresión $a+b$ es conocida como una expresión *binómica* porque tiene dos términos. Como los números $\binom{n}{r}$ aparecen como los coeficientes en el desarrollo de $(a+b)^n$, generalmente se los llama, como ya fue dicho,

coeficientes binomiales. De todos modos esta claro por la primera prueba del teorema 2.5.1 que estos números aparecen en este contexto porque representan el número de formas de hacer ciertas selecciones. Por esta razón continuaremos usando el nombre de números binomiales, que se aproxima más al concepto que simbolizan.

Además de ser extremadamente útil en manipulaciones algebraicas, el teorema del binomio puede usarse para deducir identidades en que estén involucrados los números binomiales.

Ejemplo. Probemos que

$$\sum_{i=0}^n \binom{n}{i} = \binom{n}{0} + \binom{n}{1} + \binom{n}{3} + \cdots + \binom{n}{n} = 2^n.$$

Demostración. Observar que $1 + 1 = 2$, luego, por el teorema del binomio,

$$\begin{aligned} 2^n &= (1 + 1)^n = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} 1^{n-i} 1^i \\ &= \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} 1 \cdot 1 \\ &= \sum_{i=0}^n \binom{n}{i}. \end{aligned}$$

□

Ejemplo. Probemos que

$$\binom{n}{0}^2 + \binom{n}{1}^2 + \binom{n}{3}^2 + \cdots + \binom{n}{n}^2 = \binom{2n}{n}. \quad (2.5.2)$$

Demostración. Usamos la igualdad

$$(1 + x)^n (1 + x)^n = (1 + x)^{2n}.$$

El resultado se demostrará encontrando el coeficiente del término x^n de ambos términos de esta igualdad.

De acuerdo con el teorema del binomio el miembro izquierdo es el producto de dos factores, ambos iguales a

$$\binom{n}{0} 1 + \binom{n}{1} x + \cdots + \binom{n}{r} x^r + \cdots + \binom{n}{n} x^n.$$

Cuando los dos factores se multiplican, un término en x^n se obtiene tomando un término del primer factor de tipo x^i y un término del segundo factor de tipo x^{n-i} . Por lo tanto los coeficientes de x^n en el producto son

$$\binom{n}{0}\binom{n}{n} + \binom{n}{1}\binom{n}{n-1} + \binom{n}{2}\binom{n}{n-2} + \cdots + \binom{n}{n}\binom{n}{0}. \quad (2.5.3)$$

Como $\binom{n}{n-r} = \binom{n}{r}$, vemos que (2.5.3) es el lado izquierdo de la igualdad (2.5.2). Pero el lado derecho es $\binom{2n}{n}$ que es también el coeficiente de x^n en el desarrollo de $(1+x)^{2n}$, y entonces obtenemos la igualdad que buscábamos. \square

Observación (Definición de 0^0). No hay consenso matemático en cual es el valor de 0^0 , pues dependiendo del contexto puede ser conveniente definir su valor de cierta forma o declarar su valor como *indeterminado* (ver el artículo de Wikipedia [Cero a la cero](#)).

Sin embargo, para su uso en álgebra, así como en combinatoria se considera conveniente definir $0^0 = 1$. ¿Cuál es la razón para darle este valor? Existen varias razones, pero una de las más importantes proviene del teorema del binomio. Observemos que por el teorema del binomio

$$(1+0)^n = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} 1^{n-i} 0^i = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} 0^i.$$

Es claro que para $i > 0$, $0^i = 0 \cdot \dots \cdot 0 = 0$, luego la ecuación se reduce a

$$1 = 1^n = 0^0.$$

No sería muy convincente enunciar el teorema del binomio con algunas excepciones poco naturales (como ser, exigir que a y b sean no nulos) y la formulación más general parece ser la correcta. Esta formulación exige que $0^0 = 1$, como hemos visto más arriba.

Una fundamentación extensa y rigurosa sobre la conveniencia de definir $0^0 = 1$ puede leerse en el artículo de D. Knuth *Two notes on notation* que se encuentra en <https://arxiv.org/abs/math/9205211>.

§ Ejercicios

1) Desarrollar las fórmulas de $(1+x)^8$ y $(1-x)^8$.

2) Calcular los coeficientes de:

- | | |
|--------------------------------|-------------------------------|
| a) x^5 en $(1+x)^{11}$; | b) a^2b^8 en $(a+b)^{10}$; |
| c) a^6b^6 en $(a^2+b^3)^5$; | d) x^3 en $(3+4x)^6$. |

3) Usar la identidad $(1+x)^m(1+x)^n = (1+x)^{m+n}$ para probar que

$$\binom{m+n}{r} = \binom{m}{0}\binom{n}{r} + \binom{m}{1}\binom{n}{r-1} + \cdots + \binom{m}{r}\binom{n}{0}$$

donde m, n y r son enteros positivos y, $m \geq r$, y $n \geq r$.

DIVISIBILIDAD

3.1 COCIENTE Y RESTO

Cuando somos chicos aprendemos que 6 “cabe” cuatro veces en 27 y el resto es 3, o sea

$$27 = 6 \cdot 4 + 3.$$

Un punto importante es que el resto debe ser menor que 6. Aunque, también es verdadero que, por ejemplo

$$27 = 6 \cdot 3 + 9,$$

debemos tomar el menor valor para el resto, de forma que “lo que queda” sea un número no negativo lo más chico posible. El hecho de que el conjunto de posibles “restos” tenga un mínimo es una consecuencia del axioma del buen orden.

Teorema 3.1.1. *Sean a y b números enteros cualesquiera con $b \in \mathbb{N}$, entonces existen enteros únicos q y r tales que*

$$a = b \cdot q + r \quad \text{y} \quad 0 \leq r < b.$$

Demostración. Debemos aplicar el axioma del buen orden al conjunto de los “restos”

$$R = \{x \in \mathbb{N}_0 \mid a = by + x \text{ para algún } y \in \mathbb{Z}\}.$$

Primero demostraremos que R no es vacío. Si $a \geq 0$ la igualdad

$$a = b \cdot 0 + a$$

demuestra que $a \in R$, mientras que si $a < 0$ la igualdad

$$a = b \cdot a + (1 - b) \cdot a$$

demuestra que $(1 - b) \cdot a \in R$ (en ambos casos es necesario controlar que el elemento es no negativo.)

Ahora, como R es un subconjunto no vacío de \mathbb{N}_0 , tiene un mínimo r , y como r está en R se sigue que $a = bq + r$ para algún q en \mathbb{Z} . Además

$$a = bq + r \Rightarrow a = b(q + 1) + (r - b)$$

de manera que si $r \geq b$ entonces $r - b$ esta en R . Pero $r - b$ es menor que r , contradiciendo la definición de r como el menor elemento de R . Como la suposición $r \geq b$ nos lleva a una contradicción, solo puede ocurrir que $r < b$, como queríamos demostrar.

Es fácil ver que el cociente q y el resto r obtenidos en el teorema son únicos. Supongamos que q' y r' , también satisfacen las condiciones, esto es

$$a = bq' + r' \quad \text{y} \quad 0 \leq r' < b.$$

Si $q > q'$, entonces $q - q' \geq 1$ y tenemos que

$$r' = a - bq' = (a - bq) + b(q - q') \geq r + b.$$

Como $r + b \geq b$, se sigue que $r' \geq b$ contradiciendo la segunda propiedad de r' . Por lo tanto la suposición $q' > q$ es falsa. El mismo argumento con q y q' intercambiados demuestra que $q < q'$ también es falsa. Entonces debemos tener $q = q'$, y en consecuencia $r = r'$, puesto que

$$r = a - bq = a - bq' = r'.$$

□

Ejemplo.

- Si $a = 10$ y $b = 3$, entonces $10 = 3 \cdot 3 + 1$. Es decir $q = 3$, $r = 1$.
- Si $a = 2$ y $b = 5$, entonces $2 = 5 \cdot 0 + 2$. Es decir $q = 0$, $r = 2$.
- Si $a = -10$ y $b = 3$, entonces $-10 = 3 \cdot (-4) + 2$. Es decir $q = -4$, $r = 2$. En algunos viejos compiladores del lenguaje C, la división entera estaba mal definida, pues consideraban, por ejemplo, $-10 = 3 \cdot (-3) - 1$. Es decir, si el número a a ser dividido era negativo, tomaban el resto también como un número negativo, lo cual no está de acuerdo al teorema 3.1.1.
- Si $a = -2$ y $b = 3$, entonces $-2 = 3 \cdot (-1) + 1$. Es decir $q = -1$, $r = 1$.

§ *Desarrollos en base b , ($b \geq 2$)*

Una consecuencia importante del teorema 3.1.1 es que justifica nuestro método usual de representación de enteros.

Ejemplo. Deseamos escribir el número 407 con una expresión de la forma

$$407 = r_n 5^n + r_{n-1} 5^{n-1} + \cdots + r_1 5 + r_0,$$

con $0 \leq r_i < 5$. Veamos que esto es posible y se puede hacer de forma algorítmica. La forma de hacerlo es, primero, dividir el número original y los sucesivos cocientes por 5:

$$407 = 5 \cdot 81 + 2 \quad (3.1.1)$$

$$81 = 5 \cdot 16 + 1 \quad (3.1.2)$$

$$16 = 5 \cdot 3 + 1 \quad (3.1.3)$$

$$3 = 5 \cdot 0 + 3. \quad (3.1.4)$$

Observar entonces que

$$\begin{aligned} 407 &= 5 \cdot 81 + 2 && \text{por (3.1.1)} \\ &= 5 \cdot (5 \cdot 16 + 1) + 2 && \text{por (3.1.2)} \\ &= 5^2 \cdot 16 + 5 \cdot 1 + 2 \\ &= 5^2 \cdot (5 \cdot 3 + 1) + 5 \cdot 1 + 2 && \text{por (3.1.3)} \\ &= 5^3 \cdot 3 + 5^2 \cdot 1 + 5 \cdot 1 + 2. \end{aligned}$$

En este caso diremos que el desarrollo en base 5 de 407 es 3112 o, resumidamente, $407 = (3112)_5$. Observar que el desarrollo en base 5 de 407 viene dado por los restos de las divisiones sucesiva, leídos en forma ascendente.

Sea $b \geq 2$ un número entero, llamado *base* para los cálculos. Para cualquier entero positivo x tenemos, por la aplicación repetida del teorema 3.1.1,

$$\begin{aligned} x &= bq_0 + r_0 \\ q_0 &= bq_1 + r_1 \\ &\dots \\ q_{n-2} &= bq_{n-1} + r_{n-1} \\ q_{n-1} &= bq_n + r_n. \end{aligned}$$

Aquí cada resto es uno de los enteros $0, 1, \dots, b-1$, y paramos cuando $q_n = 0$. Reemplazando sucesivamente los cocientes q_i , como lo hicimos en el ejemplo, obtenemos

$$x = r_n b^n + r_{n-1} b^{n-1} + \dots + r_1 b + r_0.$$

Hemos representado x (con respecto a la base b) por la secuencia de los restos, y escribimos $x = (r_n r_{n-1} \dots r_1 r_0)_b$. Convencionalmente $b = 10$ es la base para los cálculos hechos “a mano” y omitimos ponerle el subíndice, entonces tenemos la notación usual

$$1984 = 1 \cdot 10^3 + 9 \cdot 10^2 + 8 \cdot 10 + 4.$$

Esta notación posicional requiere símbolos solo para los enteros $0, 1, \dots, b-1$. La base $b = 2$ es particularmente adaptable para los cálculos en computadoras porque los símbolos 0 y 1 pueden representarse físicamente por la ausencia o presencia de un pulso de electricidad o luz.

Ejemplo. ¿Cuál es la representación en base 2 de $(109)_{10}$?

Demostración. Dividiendo repetidamente por 2 obtenemos

$$109 = 2 \cdot 54 + 1$$

$$54 = 2 \cdot 27 + 0$$

$$27 = 2 \cdot 13 + 1$$

$$13 = 2 \cdot 6 + 1$$

$$6 = 2 \cdot 3 + 0$$

$$3 = 2 \cdot 1 + 1$$

$$1 = 2 \cdot 0 + 1$$

Por lo tanto

$$(109)_{10} = (1101101)_2.$$

La base 16 también es usada en computación pues se utiliza el byte como unidad básica de memoria y debido a que un byte puede tomar 2^8 posibles valores, tenemos que

$$2^8 = 2^4 \cdot 2^4 = 16 \cdot 16 = 1 \cdot 16^2 + 0 \cdot 16^1 + 0 \cdot 16^0.$$

Luego un byte puede representar $(100)_{16}$ valores. Más allá de la justificación, es claro que los dígitos disponibles (del 0 al 9) no nos alcanzan para representar un número en base 16, pues se requieren 16 símbolos. La convención usada es

$$A = 10, \quad B = 11, \quad C = 12, \quad D = 13, \quad E = 14, \quad F = 15.$$

Ejemplo. Representemos 12488 en base 16.

$$12488 = 16 \cdot 780 + 8$$

$$780 = 16 \cdot 48 + 12$$

$$48 = 16 \cdot 3 + 0$$

$$3 = 16 \cdot 0 + 3.$$

Luego $12488 = (30C8)_{16}$.

□

§ Ejercicios

1) Encontrar q y r que satisfagan el teorema 3.1.1 cuando

$$a) \quad a = 1001, \quad b = 11;$$

$$b) a = 12345, \quad b = 234.$$

2) Encontrar las representaciones de $(1985)_{10}$ en:

$$a) \text{ Base 2,} \quad b) \text{ Base 5,} \quad c) \text{ Base 11.}$$

3) Encontrar las representación usual (base 10) de:

$$a) (11011101)_2, \quad b) (4165)_7.$$

3.2 DIVISIBILIDAD

Definición 3.2.1. Dados dos enteros x e y decimos que y es un *divisor* de x , y escribimos $y|x$, si

$$x = yq \quad \text{para algún } q \in \mathbb{Z}.$$

También decimos que y es un *factor* de x , que y *divide* a x , que x es *divisible* por y , y que x es *múltiplo* de y .

Cuando $y|x$ podemos usar el símbolo $\frac{x}{y}$ (o x/y) para denotar el entero q tal que $x = yq$. Cuando y no es un divisor de x tenemos que asignar un nuevo significado a la fracción x/y , puesto que este número no es un entero. El lector indudablemente, está familiarizado con las reglas para manejar fracciones, y usaremos esas reglas de tanto en tanto, pero es importante recordar que las fracciones no han sido aún formalmente definidas en el contexto de este apunte. Y es aún más importante recordar que x/y no es un elemento de \mathbb{Z} a menos que y divida a x ¹.

Observación 3.2.2. Veamos ahora algunas propiedades básicas de la relación “divide a”. Sean a, b, c enteros, entonces

- a) $1|a, \quad a|0, \quad a|\pm a;$
- b) si $a|b$, entonces $a|bc$ para cualquier c ;
- c) si $a|b$ y $a|c$, entonces $a|(b+c)$;
- d) si $a|b$ y $a|c$, entonces $a|(rb+sc)$ para cualesquiera $r, s \in \mathbb{Z}$.

Demostración. La demostración de estos hechos es sencilla, por ejemplo *c*): como $a|b$, existe q tal que $b = aq$. Análogamente, como $a|c$, existe q' tal que $c = aq'$. Entonces $b+c = aq + aq' = a(q+q')$, luego $a|(b+c)$. Las demás demostraciones se dejan como ejercicio para el lector. \square

¹ En algunos lenguajes de programación si x, y son enteros, entonces la operación x/y devuelve el cociente entero q . No usaremos esa convención en este apunte.

Ejemplo. Demostremos que si c , d y n son enteros tales que, $d|n$ y $c|\frac{n}{d}$, entonces

$$c|n \quad \text{y} \quad d|\frac{n}{c}$$

Demostración. Como $d|n$ existe un entero s tal que $n = ds$, y n/d denota al entero s . Puesto que $c|(n/d)$ existe un entero t tal que

$$s = \frac{n}{d} = ct.$$

Se sigue que

$$n = ds = d(ct) = c(dt)$$

entonces $c|n$ y n/c denota al entero dt . Finalmente, como $n/c = dt$ tenemos $d|(n/c)$, como queríamos demostrar. \square

Proposición 3.2.3. Sean a y b enteros.

- a) Si $ab = 1$ entonces $a = b = 1$ o $a = b = -1$.
- b) Si x e y son enteros tales que $x|y$ e $y|x$, entonces $x = y$ o $x = -y$.

Demostración.

a) Si a o b valen 0, entonces $ab = 0 \neq 1$. Luego a y b son distintos de 0. Si $a > 0$ y $b < 0$ por los axiomas de compatibilidad del orden con el producto $ab < 0$. Lo mismo ocurre si $a < 0$ y $b > 0$.

Es decir podemos suponer que o bien $a > 0$ y $b > 0$, o bien $a < 0$ y $b < 0$.

Si $a > 0$ y $b > 0$, entonces $a \geq 1$ y $b \geq 1$. Si $a = 1$, como $ab = 1$, tenemos que $b = 1 \cdot b = 1$. Si $a > 1$, como $b > 0$ por compatibilidad de $<$ con el producto tenemos que $ab > 1$, lo cual no es cierto. Es decir, hemos probado que si $a > 0$ y $b > 0$, entonces $a = 1$ y $b = 1$.

Si $a < 0$ y $b < 0$, entonces $-a > 0$ y $-b > 0$ y $(-a)(-b) = ab = 1$. Luego, por el párrafo de arriba, $-a = -b = 1$ y en consecuencia $a = b = -1$.

b) Sean x, y tales que $x|y$ e $y|x$. Como $x|y$, existe $q \in \mathbb{Z}$ tal que $y = qx$. Análogamente, como $y|x$ existe $q' \in \mathbb{Z}$ tal que $x = q'y$. Luego

$$y = qx = q(q'y) = (qq')y.$$

Por el axioma de cancelación (cancelando y) obtenemos que $1 = qq'$. Por lo demostrado más arriba tenemos que, o bien $q = q' = 1$ y en consecuencia $x = y$, o bien $q = q' = -1$ y en consecuencia $x = -y$. \square

§ Ejercicios

- 1) Usar el principio de inducción para demostrar que, para todo $n \geq 0$ se cumplen;
 - a) $n^2 + 3n$ es divisible por 2,
 - b) $n^3 + 3n^2 + 2n$ es divisible por 6.

3.3 EL MÁXIMO COMÚN DIVISOR Y EL MÍNIMO COMÚN MÚLTIPLO

Definición 3.3.1. Si a y b son enteros algunos de ellos no nulo, decimos que un entero no negativo d es un *máximo común divisor*, o *mcd*, de a y b si

- a) $d|a$ y $d|b$;
- b) si $c|a$ y $c|b$ entonces $c|d$.

La condición *a)* nos dice que d es un común divisor de a y b y la condición *b)* nos dice que cualquier divisor común de a y b es también divisor de d . Por ejemplo, 6 es un divisor común de 60 y 84, pero no es el mayor divisor común, porque $12|60$ y $12|84$ pero $12 \nmid 6$ (el símbolo significa “no divide”).)

Ejemplo 3.3.2. Los divisores positivos comunes de 60 y 84 son 1, 2, 3, 6 y 12, luego aunque 6 es un divisor común, no satisface *b)* de la definición, pues $12|60$ y $12|84$ pero $12 \nmid 6$. En este caso, 12 claramente es el máximo común divisor.

En el ejemplo anterior usamos dos enteros pequeños y no tuvimos problemas en encontrar el máximo común divisor. Pero ¿qué pasaría si consideráramos dos enteros muy grandes? Consideremos las siguientes preguntas.

- Dados $a, b \in \mathbb{Z}$ arbitrarios, alguno de ellos no nulo ¿existe el máximo común divisor? Si existe, ¿hay una forma eficiente de calcularlo?
- ¿Cuántos máximos común divisores puede tener un par de enteros?

En el desarrollo de esta sección responderemos estas preguntas.

Proposición 3.3.3. Sean a y b números enteros, algunos de ellos no nulo, entonces el mcd, si existe, es único.

Demostración. Sean d y d' dos enteros no negativos que satisfacen las propiedades de la definición del máximo común divisor, como $d'|a$, $d'|b$ y d satisface la propiedad *b)* de la definición de mcd, se deduce que $d|d'$.

Intercambiando los papeles de d y d' se obtiene que $d'|d$. Luego, $d|d'$, $d'|d$ y $d, d' \geq 0$, entonces, por proposición 3.2.3 b), se obtiene que $d = d'$. \square

Definición 3.3.4. Sean a, b enteros, entonces dados $s, t \in \mathbb{Z}$ diremos que

$$sa + tb$$

es una *combinación lineal entera* de a y b .

Observación. Sean $a, b \in \mathbb{Z}$, alguno de ellos no nulo, y d un máximo común divisor de a y b . Entonces, d divide a cualquier combinación lineal entera de a y b . Esto es una consecuencia directa de la observación 3.2.2 d).

Teorema 3.3.5. Sean $a, b \in \mathbb{Z}$, alguno de ellos no nulo. Sea d el mínimo entre todas las combinaciones lineales enteras positivas de a y b . Entonces, d es el máximo común divisor de a y b .

Demostración. Sin pérdida de generalidad podemos suponer que $a \neq 0$. Sea

$$S = \{ma + nb : m, n \in \mathbb{Z}, ma + nb > 0\},$$

el conjunto de las combinaciones lineales positivas de a y b . Como a o $-a$ pertenecen a S , tenemos que $S \neq \emptyset$, luego, por el principio de buena ordenación, S tiene un mínimo d . Probaremos ahora que d es un máximo común divisor de a y b .

Propiedad b). Puesto que $d \in S$, existen $s, t \in \mathbb{Z}$ tal que $d = sa + tb$. Sea c tal que $c|a$ y $c|b$, por d) de la observación 3.2.2, tenemos que $c|sa + tb$, es decir $c|d$.

Propiedad a). Supongamos ahora que $d \nmid a$, entonces $|a| = qd + r$ con $0 < r < d$ y $q \geq 0$, luego $r = \pm a - qd = \pm a - q(sa + tb) = a(\pm 1 - qs) + (-qt)b$. Por lo tanto, $r < d$ pertenece a S , contradiciendo el hecho de que d es un mínimo de S . La contradicción vino de suponer que $d \nmid a$, por lo tanto $d|a$. En forma análoga podemos probar que $d|b$. \square

Si a, b enteros, alguno de ellos no nulo, denotaremos al máximo común divisor de a y b por $\text{mcd}(a, b)$ o, en caso de no haber confusión, por (a, b) .

Observación 3.3.6. Sean a, b enteros, alguno de ellos no nulo, y a', b' otro par de enteros tal que se cumple la propiedad:

$$c|a \wedge c|b \Leftrightarrow c|a' \wedge c|b',$$

es decir, c es divisor de a y b si y solo si es divisor de a' y b' . Entonces, $\text{mcd}(a, b) = \text{mcd}(a', b')$.

Ejemplo. Hallar $\text{mcd}(174, 72)$.

Solución.

Divisores de 174: 1, 2, 3, 6, 29, 58, 87, 174

Divisores de 72: 1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 12, 18, 24, 36, 72

Luego, 6 es divisor común de 174 y 72, y todos los demás divisores comunes (1, 2 y 3) dividen a 6. Por lo tanto $\text{mcd}(174, 72) = 6$. \square

Corolario 3.3.7. Sean $a, b \in \mathbb{Z}$, alguno de ellos no nulo. Entonces existen $s, t \in \mathbb{Z}$ tal que

$$(a, b) = sa + tb.$$

Demostración. Se deduce trivialmente del teorema anterior. \square

Corolario 3.3.8. Sean a y b enteros uno de ellos no nulo, entonces

$$(a, b) = 1 \Leftrightarrow \text{existen } s, t \in \mathbb{Z} \text{ tales que } 1 = sa + tb.$$

Demostración. (\Rightarrow) Es consecuencia trivial de la proposición anterior.

(\Leftarrow) Sea $d = (a, b)$, entonces $d|a$ y $d|b$ y por lo tanto $d|sa + tb$ para cualesquiera $s, t \in \mathbb{Z}$. En particular, la hipótesis implica que $d|1$ y, en consecuencia $d = 1$. \square

Definición 3.3.9. Si $(a, b) = 1$ entonces decimos que a y b son *coprimos*.

Ejemplo. Sean a y b enteros coprimos y $c \in \mathbb{Z}$, entonces,

$$a|c \wedge b|c \Rightarrow ab|c.$$

Solución. como a y b son coprimos, existen $s, t \in \mathbb{Z}$ tales que $1 = sa + tb$. Por lo tanto, multiplicando por c la ecuación, obtenemos $c = csa + ctb$. Como $a|c$, tenemos que $c/a \in \mathbb{Z}$, y

$$\frac{c}{a} = \frac{csa + ctb}{a} = cs + \left(\frac{c}{a}\right)tb.$$

Como $b|c$ y $b|b$, entonces $b|cs + (c/a)tb = c/a$, luego $(c/a)/b$ entero, es decir $ab|c$. \square

Podemos enunciar las propiedades más sencillas del mcd en la siguiente proposición

Proposición 3.3.10. Sean a, b enteros con $a \neq 0$, entonces

$$(1) \text{ mcd}(b, a) = \text{mcd}(a, b) = \text{mcd}(\pm a, \pm b),$$

$$(2) \text{ si } a > 0, \text{ mcd}(a, 0) = a \text{ y } \text{mcd}(a, a) = a,$$

$$(3) \text{ mcd}(1, b) = 1.$$

Demostración. Estas propiedades son de demostración casi trivial, por ejemplo para demostrar que $\text{mcd}(1, b) = 1$ comprobamos que 1 cumple con la definición:

$$a) 1|1 \text{ y } 1|b;$$

$$b) \text{ si } c|1 \text{ y } c|b \text{ entonces } c|1,$$

propiedades que son obviamente verdaderas.

1. y 2. se dejan a cargo del lector. □

La siguiente propiedad no es tan obvia y resulta muy importante.

Propiedad 3.3.11. Si $a \neq 0, b \in \mathbb{Z}$, entonces $\text{mcd}(a, b) = \text{mcd}(a, b - a)$.

Demostración. Sea $d = \text{mcd}(a, b - a)$, luego

$$a) d|a \text{ y } d|b - a;$$

$$b) \text{ si } c|a \text{ y } c|b - a \text{ entonces } c|d.$$

Ahora bien, como $d|a$ y $d|b - a$, entonces $d|a + (b - a) = b$. Es decir, para recalcar,

$$(a') d|a \text{ y } d|b.$$

Por otro lado, si $c|a$ y $c|b$, entonces $c|b - a$, luego por *b)* tenemos que $c|d$. Es decir,

$$(b') \text{ si } c|a \text{ y } c|b, \text{ entonces } c|d.$$

Luego, por definición de mcd , obtenemos que $d = \text{mcd}(a, b)$. □

La propiedad anterior nos provee un método práctico para encontrar el máximo común divisor entre dos números, como vemos en el siguiente ejemplo.

Ejemplo. Encontrar el mcd entre 72 y 174.

Solución. Observar que

$$\begin{aligned} \text{mcd}(72, 174) &= \text{mcd}(72, 174 - 72) = \text{mcd}(72, 102) = \text{mcd}(72, 30) = \text{mcd}(42, 30) \\ &= \text{mcd}(12, 30) = \text{mcd}(12, 18) = \text{mcd}(12, 6) = \text{mcd}(6, 6) = 6. \end{aligned}$$

□

En general no es sencillo encontrar todos los divisores de un número entero grande. Por ejemplo, para los números de más de cien dígitos no es posible, en general, calcular sus divisores ni con las computadoras más poderosas de la actualidad. Por lo tanto, no es factible calcular el mcd de números grandes revisando todos los divisores comunes. El algoritmo que nos provee la propiedad 3.3.11 nos da un método práctico y relativamente eficiente para calcular el mcd. Veremos a continuación un método similar pero mucho más eficiente para calcular el mcd de dos enteros no negativos a, b con $b \neq 0$. Este método está basado en la técnica del cociente y el resto y depende del siguiente hecho.

Proposición 3.3.12. Sean a, b enteros no negativos con $b \neq 0$, entonces

$$a = bq + r \quad \Rightarrow \quad \text{mcd}(a, b) = \text{mcd}(b, r). \quad (3.3.1)$$

Demostración. Para demostrar esto debemos observar que si c divide a a y b , entonces también divide a $a - bq$; y como $a - bq = r$, tenemos que $c|r$. De este modo cualquier divisor común de a y b es también divisor común de b y r . Por otro lado si c divide b y r también divide a $a = bq + r$. Es decir, c es divisor común de a y b si y sólo si c es divisor común de b y r . Por lo tanto, por observación 3.3.6, obtenemos que $d = \text{mcd}(b, r)$. □

La aplicación repetida de este simple hecho, en combinación con el algoritmo de división, nos da un método para calcular el mcd.

Ejemplo. Encuentre el mcd de 2406 y 654.

Solución. Tenemos

$$\begin{aligned} \text{mcd}(2406, 654) &= \text{mcd}(654, 444) && \text{porque } 2406 = 654 \cdot 3 + 444, \\ &= \text{mcd}(444, 210) && \text{porque } 654 = 444 \cdot 1 + 210, \\ &= \text{mcd}(210, 24) && \text{porque } 444 = 210 \cdot 2 + 24, \\ &= \text{mcd}(24, 18) && \text{porque } 210 = 24 \cdot 8 + 18, \\ &= \text{mcd}(18, 6) && \text{porque } 24 = 18 \cdot 1 + 6, \\ &= \text{mcd}(6, 0) = 6 && \text{porque } 18 = 6 \cdot 3 + 0 \end{aligned}$$

□

Este ejemplo es un caso particular o una aplicación del algoritmo que nos permite calcular el máximo común divisor.

Algoritmo de Euclides

Por lo general, para calcular el mcd de enteros a y b , con $b > 0$, definimos q_i y r_i recursivamente de la siguiente manera:
 $r_0 = a$, $r_1 = b$, y

$$\begin{array}{lll}
 (e_1) & r_0 = r_1 q_1 + r_2 & (0 < r_2 < r_1) \\
 (e_2) & r_1 = r_2 q_2 + r_3 & (0 < r_3 < r_2) \\
 (e_3) & r_2 = r_3 q_3 + r_4 & (0 < r_4 < r_3) \\
 \dots & & \\
 (e_i) & r_{i-1} = r_i q_i + r_{i+1} & (0 < r_{i+1} < r_i) \\
 \dots & & \\
 (e_{k-1}) & r_{k-2} = r_{k-1} q_{k-1} + r_k & (0 < r_k < r_{k-1}) \\
 (e_k) & r_{k-1} = r_k q_k + 0, &
 \end{array}$$

Cuadro 1: Algoritmo de Euclides

El proceso se detiene cuando uno de los restos r_i es igual a 0 y queda claro que el proceso debe detenerse, porque cada resto no nulo es positivo y estrictamente menor que el anterior.

Este procedimiento es conocido como el *algoritmo de Euclides*, debido al matemático griego Euclides (300 a. c.). Es extremadamente útil en la práctica, y tiene importantes consecuencias.

Teorema 3.3.13. Sean a y b enteros con $b > 0$, entonces el máximo común divisor existe y es el último resto no nulo obtenido en el algoritmo de Euclides (con la notación anterior es r_k).

Demostración. Observar que aplicando repetidas veces la fórmula (3.3.1) obtenemos

$$\begin{aligned}
 r_k &= \text{mcd}(r_k, 0) = \text{mcd}(r_{k-1}, r_k) = \text{mcd}(r_{k-2}, r_{k-1}) = \dots \\
 &\dots = \text{mcd}(r_2, r_3) = \text{mcd}(r_1, r_2) = \text{mcd}(r_0, r_1) = \text{mcd}(a, b)
 \end{aligned}$$

□

Observación ().* El algoritmo de Euclides es fácilmente implementable en un lenguaje de programación. A continuación una versión del mismo en pseudocódigo.

ALGORITMO DE EUCLIDES

```

# pre: a y b son números positivos
# post: Obtenemos d = mcd(a,b)
i, j = a, b
while j != 0:
    # invariante: mcd(a, b) = mcd(i, j)
    resto = i % j # i = q * j + resto
    i, j = j, resto
d = i

```

Observar que en el ciclo while los valores que se obtienen en cada repetición son $i' = j$, $j' = i \% j$, luego

$$i = q \cdot j + j' \Rightarrow \text{mcd}(i, j) = \text{mcd}(j, j') = \text{mcd}(i', j').$$

Sean a y b enteros, b no nulo y sea $d = \text{mcd}(a, b)$. Entonces sabemos que existen enteros s y t tales que

$$d = sa + tb.$$

La idea ahora es calcular s y t . En el caso que $b > 0$, de acuerdo con el cálculo hecho antes $d = r_k$ y usando la ecuación (e_{k-1}) tenemos

$$r_k = r_{k-2} - r_{k-1}q_{k-1}.$$

Así, d puede escribirse en la forma $d = s_k r_{k-2} + t_k r_{k-1}$, donde $s_k = 1$ y $t_k = -q_{k-1}$. Usando la ecuación (e_{k-2}) , sustituyendo r_{k-1} en términos de r_{k-3} y r_{k-2} obtenemos

$$d = s_k(r_{k-3} - r_{k-2}q_{k-2}) + t_k r_{k-3} = s_{k-1}r_{k-3} + t_{k-1}r_{k-2}$$

donde $s_{k-1} = s_k + t_k$ y $t_{k-1} = -s_k q_{k-2}$. Aplicando repetidas veces las ecuaciones del algoritmo de Euclides obtenemos, en general que

$$d = s_i r_{i-2} + t_i r_{i-1}$$

con $s_i, t_i \in \mathbb{Z}$, para $2 \leq i \leq k$. En particular

$$d = s_2 r_0 + t_2 r_1 = s_2 a + t_2 b.$$

Ejemplo. Encontrar usando el algoritmo de Euclides $d = \text{mcd}(470, 55)$ y expresar d como combinación lineal entera entre 470 y 55.

Solución.

$$470 = 55 \cdot 8 + 30 \Rightarrow 30 = 470 + (-8) \cdot 55 \quad (1)$$

$$55 = 30 \cdot 1 + 25 \Rightarrow 25 = 55 + (-1) \cdot 30 \quad (2)$$

$$30 = 25 \cdot 1 + 5 \Rightarrow 5 = 30 + (-1) \cdot 25 \quad (3)$$

$$25 = 5 \cdot 5 + 0.$$

Luego, el máximo común divisor de 470 y 55 es 5 y de las fórmulas anteriores obtenemos:

$$\begin{aligned}
 5 &= 30 + (-1) \cdot 25 && \text{(por (3))} \\
 &= 30 + (-1) \cdot (55 + (-1) \cdot 30) = 2 \cdot 30 + (-1) \cdot 55 && \text{(por (2))} \\
 &= 2 \cdot (470 + (-8) \cdot 55) + (-1) \cdot 55 = 2 \cdot 470 + (-17) \cdot 55 && \text{(por (1))}
 \end{aligned}$$

De este modo, la expresión requerida $d = sa + tb$ es

$$5 = 2 \cdot 470 + (-17) \cdot 55.$$

□

El hecho de que el máximo común divisor de dos enteros a y b puede ser escrito como una combinación lineal entera de a y b (proposición 3.3.7) es una herramienta de suma utilidad para trabajar en problemas relacionados con el mcd. Por ejemplo, todos estamos familiarizados con la idea de que una fracción puede reducirse al “mínimo término”, o sea a la forma a/b con a y b coprimos. El siguiente ejemplo establece que esta forma es única, y como veremos, el hecho clave de la demostración es que podemos expresar a 1 como $sa + tb$.

Ejemplo. Supongamos que a, a', b, b' son enteros positivos que satisfacen

$$a) \ ab' = a'b; \qquad b) \ \text{mcd}(a, b) = \text{mcd}(a', b') = 1.$$

Entonces $a = a'$ y $b = b'$.

(La condición *a)* podría escribirse como $a/b = a'/b'$, pero preferimos usar esta forma que no asume ningún conocimiento sobre fracciones.)

Demostración. Como por *b)* el $\text{mcd}(a, b) = 1$ existen enteros s y t tales que $sa + tb = 1$. En consecuencia

$$b' = (sa + tb)b' = sab' + tbb' \stackrel{a)}{=} sa'b + tb'b = (sa' + tb')b,$$

y por lo tanto $b|b'$. Por un argumento similar y usando el hecho de que el $\text{mcd}(a', b') = 1$ deducimos que $b|b'$, por lo tanto $b = b'$ o $b = -b'$ y como b y b' son ambos positivos debemos tener $b = b'$. Ahora de *a)* deducimos que $a = a'$ y el resultado está demostrado. □

Observación ().* El algoritmo explicado anteriormente para obtener el $\text{mcd}(a, b)$ como combinación lineal entera $sa + tb$ no es muy sencillo de programar. Más aún, requiere terminar el cálculo del mcd usando el algoritmo de Euclides, para comenzar a calcular los coeficientes enteros s, t . Veremos a continuación un algoritmo sencillo de programar que nos devuelve s y t . El algoritmo se basa en el siguiente resultado.

Proposición 3.3.14. Sean, a, b enteros, $b > 0$, y r_i, q_i los restos y cocientes obtenidos en el algoritmo de Euclides (ver tabla 1). Entonces,

a) para $0 \leq i \leq k$, existen $s_i, t_i \in \mathbb{Z}$ tal que

$$r_i = s_i a + t_i b.$$

b) $s_0, t_0 = 1, 0$, $s_1, t_1 = 0, 1$ y

$$s_i = s_{i-2} - q_{i-1} s_{i-1}, \quad t_i = t_{i-2} - q_{i-1} t_{i-1}, \quad (3.3.2)$$

para $i \geq 2$.

Demostración. a) Lo haremos por inducción sobre i .

Como r_i se define con una recursión que se basa en los dos casos anteriores, el caso base debe hacerse en dos valores: $i = 0$ e $i = 1$, pero como $r_0 = a$ (en este caso $s_0 = 1, s_1 = 0$) y $r_1 = b$ (en este caso $s_0 = 0, s_1 = 1$), se cumple el enunciado para el caso base.

Paso inductivo. Si $i > 1$, tenemos

$$\begin{aligned} r_i &= r_{i-2} + (-q_{i-1})r_{i-1} \\ &= s_{i-2}a + t_{i-2}b + (-q_{i-1})(s_{i-1}a + t_{i-1}b) \quad (\text{hipótesis inductiva}) \\ &= (s_{i-2} - q_{i-1}s_{i-1})a + (t_{i-2} - q_{i-1}t_{i-1})b. \end{aligned}$$

b) Es claro por la demostración de a). □

Con el uso de b) de la proposición anterior, podemos escribir el algoritmo para obtener s, t tal $\text{mcd}(a, b) = sa + tb$ con el siguiente pseudocódigo.

ALGORITMO DE EUCLIDES 2

```
# pre: a y b son números positivos
# post: Obtenemos s y t tal que  $\text{mcd}(a, b) = a*s + b*t$ 
r[0], r[1] = a, b
s[0], t[0], s[1], t[1] = 1, 0, 0, 1
i = 1
while r[i] != 0:
    # invariante:  $r[i-1] = a * s[i-1] + b * t[i-1]$ 
    # y  $\text{mcd}(a, b) = \text{mcd}(r[i-1], r[i])$ 
    q, r[i+1] = r[i-1] // r[i], r[i-1] % r[i]
    s[i+1] = s[i-1] - s[i] * q
    t[i+1] = t[i-1] - t[i] * q
    i = i+1
s, t = s[i-1], t[i-1]
```

Sin embargo, este algoritmo no es muy conveniente, a nivel de eficiencia de memoria, pues las variables r , s y t van guardando series de valores en forma innecesaria.

Una versión mejorada, aunque menos legible, es la siguiente.

ALGORITMO DE EUCLIDES 2 (VERSIÓN 2)

```
# pre: a y b son números positivos
# post: Obtenemos s y t tal que mcd(a,b) = a*s + b*t
r0, r1 = a, b
s0, t0, s1, t1 = 1, 0, 0, 1
while r1 != 0:
    # invariante: r0 = a * s0 + b * t0 y
    #             mcd(a, b) = mcd(r0, r1)
    resto = r0 % r1
    q, r0, r1 = r0 // r1, r1, resto
    s1p, t1p = s1, t1
    s0, t0, s1, t1 = s1p, t1p, s0 - s1 * q, t0 - t1 * q
s, t = s0, t0
```

Este último código y el de la página 57 son códigos válidos en Python 3 y pueden ser incorporados a un programa escrito en ese lenguaje.

§ Mínimo común múltiplo

Definición 3.3.15. Sean a y b enteros no nulos. Decimos que un entero positivo m es el *mínimo común múltiplo*, o *mcm*, de a y b si

- a) $a|m$ y $b|m$;
- b) si $a|n$ y $b|n$ entonces $m|n$.

La condición *a)* nos dice que m es múltiplo común de a y b , la condición *b)* nos dice que cualquier otro múltiplo de a y b también debe ser múltiplo de m . Por ejemplo hallemos el mínimo común múltiplo entre 8 y 14. Escribamos los múltiplos de ambos números y busquemos el menor común a ambos. Los primeros múltiplos de 8 son: 8, 16, 24, 32, 40, 48, 56, Los primeros múltiplos de 14 son: 14, 28, 42, 56, 72, Luego se tiene $\text{mcm}(8, 14) = 56$. Nos faltaría comprobar que cualquier múltiplo de 8 y 14 es múltiplo de 56, pero eso se deduce fácilmente de los resultados que veremos a continuación.

El siguiente teorema garantiza la existencia del mcm.

Teorema 3.3.16. Sean a y b enteros no nulos, entonces

$$\text{mcm}(a, b) = \frac{ab}{\text{mcd}(a, b)}.$$

Demostración. Demostraremos que

$$m = \frac{ab}{\text{mcd}(a, b)}$$

es el mínimo común múltiplo de a , b .

Como

$$m = \frac{ab}{\text{mcd}(a, b)} = \frac{a}{\text{mcd}(a, b)}b = a \frac{b}{\text{mcd}(a, b)}$$

resulta que m es múltiplo de a y b , y por lo tanto se satisface (a) de la definición de mínimo común múltiplo. Veamos ahora (b): sea $n \in \mathbb{Z}$ tal que $a|n$ y $b|n$. Como existen enteros r, s tales que

$$\text{mcd}(a, b) = ra + sb, \quad (3.3.3)$$

dividiendo la ecuación (3.3.3) por $\text{mcd}(a, b)$ y multiplicando por n , obtenemos la siguiente ecuación:

$$n = r \frac{a}{\text{mcd}(a, b)}n + s \frac{b}{\text{mcd}(a, b)}n. \quad (3.3.4)$$

Escribiendo $n = b'b = a'a$ (a', b' en \mathbb{Z}) y haciendo los reemplazos en (3.3.4), resulta finalmente

$$n = rb' \frac{ab}{\text{mcd}(a, b)} + sa' \frac{ab}{\text{mcd}(a, b)} = \frac{ab}{\text{mcd}(a, b)}(rb' + sa')$$

lo cual demuestra que m divide a n . \square

En particular este resultado implica que si a y b son enteros coprimos, entonces $\text{mcm}(a, b) = ab$.

Ejemplo. Encontrar el mcm de 8 y 14.

Solución. Es claro que $2 = \text{mcd}(8, 14)$, luego $\text{mcm}(8, 14) = 8 \cdot 14 / 2 = 56$. \square

§ Ejercicios

- 1) Encontrar el mcd de 721 y 448 y expresarlo en la forma $721m + 448n$ con $m, n \in \mathbb{Z}$.

- 2) Usar proposición 3.3.7 para demostrar que si a , b y n son enteros no nulos, entonces $\text{mcd}(na, nb) = n \text{mcd}(a, b)$.
- 3) Usar el Ej. 2 para demostrar que si el $\text{mcd}(a, b) = d$, entonces

$$\text{mcd}\left(\frac{a}{d}, \frac{b}{d}\right) = 1.$$

- 4) Sean a y b enteros positivos y sea $d = \text{mcd}(a, b)$. Probar que existen enteros x e y que satisfacen la ecuación $ax + by = c$ si y solo si $d|c$.
- 5) Encontrar enteros x e y que satisfagan $966x + 685y = 70$.

3.4 FACTORIZACIÓN EN PRIMOS

Definición 3.4.1. Se dice que un entero positivo p es *primo* si $p \geq 2$ y los únicos enteros positivos que dividen p son 1 y p mismo.

Luego si un entero $m \geq 2$ no es un primo si y sólo si existe m_1 divisor de m tal que $m_1 \neq 1, m$, es decir con $1 < m_1 < m$. Sea m_2 el cociente de m por m_1 : es claro que $m_2 \neq 1, m$ y por lo tanto $1 < m_2 < m$. Concluyendo,

un entero $m \geq 2$ no es un primo si y sólo si $m = m_1 m_2$ donde m_1 y m_2 son enteros estrictamente entre 1 y m .

Enfatizamos que de acuerdo a la definición, 1 *no* es primo.

Los primeros primos (los menores que 100) son

2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29, 31, 37, 41, 43, 47, 53, 59, 61, 67, 71, 73, 79, 83, 89 y 97.

Observación (Criba de Eratóstenes *). Una forma de encontrar números primos es con la *criba de Eratóstenes*. Es un algoritmo que permite hallar todos los números primos menores que un número natural dado n . Se forma una lista con todos los números naturales comprendidos entre 2 y n , y se van tachando los números que no son primos de la siguiente manera: comenzando por el 2, se tachan todos sus múltiplos; comenzando de nuevo, cuando se encuentra un número entero que no ha sido tachado, ese número es declarado primo, y se procede a tachar todos sus múltiplos y así sucesivamente. El proceso termina cuando alcanzamos n .

Podemos expresar el algoritmo en pseudocódigo:

CRIBA DE ERATÓSTENES

```

# pre: n número natural
# post: se obtiene ''primos'' la lista de números primos hasta n
primos = [] # lista vacía
tachados = [] # lista de números tachados
for i = 2 to n:
    if i not in tachados:
        primos.append(i) # agregar i a primos
        k = 2
        while k * i <= n:
            tachados.append(k * i) # agrega k*i a tachados
            k = k + 1

```

Este código en si no es eficiente, pero muestra una forma sencilla de obtener primos con el uso de la criba de Eratóstenes.

El lector debe estar casi totalmente familiarizado con la idea de que cualquier entero positivo puede expresarse como producto de primos: por ejemplo

$$825 = 3 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 11.$$

La existencia de esta factorización en primos para cualquier entero positivo es una consecuencia del axioma del buen orden.

Teorema 3.4.2. *Todo entero mayor que 1 es producto de números primos.*

Demostración. Sea B el conjunto de enteros positivos que no tienen una factorización en primos.

Si B no es vacío entonces, por el axioma del buen orden, tiene un mínimo m. Si m fuera un primo p entonces tendríamos la factorización trivial $m = p$; por lo tanto m no es primo y existen m_1, m_2 enteros positivos con $1 < m_1 < m$ y $1 < m_2 < m$ tal que $m = m_1 m_2$.

Como estamos suponiendo que m es el menor entero (≥ 2) que no tiene factorización en primos, entonces m_1 y m_2 tienen factorización en primos. Pero entonces la ecuación $m = m_1 m_2$ produce una factorización en primos de m, contradiciendo la suposición de que m era un elemento de B. Por lo tanto B debe ser vacío, y la afirmación esta probada. \square

Ejemplo. Encontremos la factorización en números primos de 201 000. Esto se hace dividiendo sucesivamente los números hasta llegar a factores primos:

$$\begin{aligned}
 201\,000 &= 201 \cdot 1000 = 3 \cdot 67 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 \\
 &= 3 \cdot 67 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 2 \cdot 5 \\
 &= 2^3 \cdot 3 \cdot 5^3 \cdot 67.
 \end{aligned}$$

Como vimos más arriba 2, 3, 5 y 67 son números primos y por lo tanto hemos obtenido la descomposición prima de 201 000.

Veamos ahora alguna propiedades básicas de los números primos.

Observación 3.4.3. Sea $a \in \mathbb{Z}$ y p primo. Entonces

- a) Si $p \nmid a$, entonces $\text{mcd}(a, p) = 1$.
- b) Si p y p' son primos y $p|p'$ entonces $p = p'$.

Demostración.

a) Como los únicos divisores de p son p y 1, y $p \nmid a$, el único divisor común de p y a es 1.

b) p' es primo, por lo tanto tiene sólo dos divisores positivos 1 y p' . Como p no es 1, tenemos que $p = p'$. \square

Para encontrar la descomposición prima de un número, digamos n , debemos ir tomando todos los números menores a n y comprobando si estos lo dividen o no. En lo que sigue veremos el criterio de la raíz, que se utiliza para comprobar si un número es primo en menos pasos que la comprobación directa.

Lema 3.4.4. Si $n > 0$ no es primo, entonces existe $m > 0$ tal que $m|n$ y $m \leq \sqrt{n}$.

Demostración. Si n no es primo, entonces $n = m_1 m_2$ con $1 < m_1, m_2 < n$. Supongamos que $m_1, m_2 > \sqrt{n}$, entonces $n = m_1 m_2 > \sqrt{n} \sqrt{n} = n$, lo cual es una contradicción. Por lo tanto, m_1 o m_2 debe ser menor o igual que \sqrt{n} y por consiguiente encontramos un divisor de n menor o igual a \sqrt{n} . \square

Proposición 3.4.5 (Criterio de la raíz). Sea $n \geq 2$. Si para todo m tal que $1 < m \leq \sqrt{n}$ se cumple que $m \nmid n$, entonces n es primo.

Demostración. Supongamos que n no es primo, luego, por el lema anterior, existe m tal que $m|n$ y $1 < m \leq \sqrt{n}$ y esto contradice nuestras hipótesis. La contradicción se produce al suponer que n no es primo, por lo tanto n es primo. \square

Este criterio reduce enormemente la cantidad de pruebas que debemos hacer para verificar si un número es primo.

Ejemplo. Verifiquemos si 467 es primo o no.

Solución. Observar primero que si no utilizamos el criterio de la raíz deberíamos hacer 465 divisiones: deberíamos comprobar si $m|467$ con $1 < m < 467$.

Como $\sqrt{467} < 22$, por el criterio de la raíz, sólo debemos comprobar si $m|467$ para $2 \leq m \leq 21$. Un sencilla comprobación (dividiendo) muestra que los números $2, 3, \dots, 20, 21$ no dividen a 467 y por lo tanto 467 es primo. \square

La facilidad con la que establecemos la existencia de la factorización de primos conlleva dos dificultades importantes. Primero el problema de encontrar los factores primos no es de ningún modo directo; y segundo no es obvio que exista una *única* factorización en primos para todo entero dado $n \geq 2$. El siguiente resultado es un paso clave en la demostración de la unicidad.

Teorema 3.4.6. *Sea p un número primo.*

- a) *Si $p|xy$ entonces $p|x$ o $p|y$.*
- b) *x_1, x_2, \dots, x_n son enteros tales que*

$$p|x_1x_2 \dots x_n$$

entonces $p|x_i$ para algún x_i ($1 \leq i \leq n$).

Demostración.

a) Si $p|x$ ya está probado el resultado. Si $p \nmid x$ entonces tenemos $\text{mcd}(x, p) = 1$. Por proposición 3.3.7, existen enteros r y s tales que $rp + sx = 1$. Por lo tanto tenemos

$$y = 1 \cdot y = (rp + sx)y = (ry)p + s(xy).$$

Como $p|p$ y $p|xy$, entonces divide a ambos términos y se sigue que $p|y$.

b) Usemos el principio de inducción. El resultado es obviamente verdadero cuando $n = 1$ (base inductiva).

Ahora, supongamos que el resultado es verdadero cuando $n = k$, es decir si $p|x_1x_2 \dots x_k$, entonces $p|x_i$ para algún i con $1 \leq i \leq k$ (hipótesis inductiva).

Debemos probar que si $p|x_1x_2 \dots x_kx_{k+1}$, entonces $p|x_i$ para algún x_i ($1 \leq i \leq k+1$).

Supongamos $p|x_1x_2 \dots x_kx_{k+1}$ y sea $x = x_1x_2 \dots x_k$. Si $p|x$ entonces, por la hipótesis inductiva, $p|x_i$ para algún x_i en el rango $1 \leq i \leq k$. Si $p \nmid x$ entonces, por 1), se sigue que $p|x_{k+1}$. De este modo, en ambos casos p divide uno de los x_i ($1 \leq i \leq k+1$). \square

Un error común es asumir que el teorema 3.4.6 se mantiene verdadero cuando reemplazamos el primo p por un entero arbitrario. Pero esto claramente falso: por ejemplo

$$6 \mid 3 \cdot 8 \quad \text{pero} \quad 6 \nmid 3 \quad \text{y} \quad 6 \nmid 8.$$

Ejemplos como éste nos ayudan a entender que el teorema 3.4.6 expresa una propiedad muy significativa de los números primos. Además veremos que esta propiedad juega un papel crucial en el siguiente resultado, que a veces es llamado el *Teorema Fundamental de la Aritmética*.

Teorema 3.4.7. *La factorización en primos de un entero positivo $n \geq 2$ es única, salvo el orden de los factores primos.*

Demostración. Por el axioma del buen orden, si existe un entero para el cual el teorema es falso, entonces hay un entero mínimo $n_0 \geq 0$ con esta propiedad. Supongamos entonces que

$$n_0 = p_1 p_2 \dots p_k \quad \text{y} \quad n_0 = p'_1 p'_2 \dots p'_l,$$

donde los p_i ($1 \leq i \leq k$) son primos, no necesariamente distintos, y los p'_i ($1 \leq i \leq l$) son primos, no necesariamente distintos. La primera ecuación implica que $p_1 \mid n_0$, y la segunda ecuación implica que $p_1 \mid p'_1 p'_2 \dots p'_l$. Por consiguiente por teorema 3.4.6 tenemos que $p_1 \mid p'_j$ para algún j ($1 \leq j \leq l$). Reordenando la segunda factorización podemos asumir que $p_1 \mid p'_1$, y puesto que p_1 y p'_1 son primos, se sigue que $p_1 = p'_1$ (observación 3.4.3-(3)). Luego por el axioma (I7), podemos cancelar los factores p_1 y p'_1 , y obtener

$$p_2 p_3 \dots p_k = p'_2 p'_3 \dots p'_l,$$

y llamemos a esto n_1 . Pero supusimos que n_0 tenía dos factorizaciones diferentes, y hemos cancelado el mismo número ($p_1 = p'_1$) en ambas factorizaciones, luego n_1 tiene también dos factorizaciones primas diferentes. Esto contradice la definición de n_0 como el mínimo entero sin factorización única. Por lo tanto el teorema es verdadero para $n \geq 2$. \square

En la práctica a menudo reunimos los primos iguales en la factorización de n y escribimos

$$n = p_1^{e_1} p_2^{e_2} \dots p_r^{e_r},$$

donde p_1, p_2, \dots, p_r son primos distintos y e_1, e_2, \dots, e_r son enteros positivos. Por ejemplo $7000 = 2^3 \cdot 5^3 \cdot 7$.

La factorización prima nos dice que los números primos son los “ladrillos” esenciales para “construir” los números enteros usando multiplicaciones. Ahora bien, podría ocurrir que haya un número finitos de ellos y que podamos escribir cada número como producto de primos en forma muy sintética. Pero este no es el caso.

Proposición 3.4.8 (Teorema de Euclides). *Existen infinitos números primos.*

Demostración. Haremos la demostración por el absurdo: supongamos que existen en total r números primos p_1, p_2, \dots, p_r . Sea $n = p_1 p_2 \dots p_r + 1$. Sea p primo tal que $p|n$. Como la lista de primos es exhaustiva, existe i con $1 \leq i \leq r$ tal que $p = p_i$. Ahora bien $p_i|n$ y $p_i|p_1 p_2 \dots p_r$, luego $p_i|n - p_1 p_2 \dots p_r = 1$, lo cual es un absurdo que vino de suponer que el número de primos es finito. \square

Ejemplo. Probemos que si m y n son enteros tales que $m \geq 2$ y $n \geq 2$, entonces $m^2 \neq 2n^2$.

Demostración. Supongamos que la factorización prima de n contiene al 2 elevado a la x (donde x es cero si 2 no es factor primo de n). Entonces $n = 2^x h$, donde h es producto de primos más grandes que 2, luego

$$2n^2 = 2(2^x h)^2 = 2^{2x+1} h^2.$$

Por lo tanto 2 está elevado a una potencia *impar* en la factorización prima de $2n^2$.

Por otro lado, si $m = 2^y g$, donde g es producto de primos mayores que 2, entonces

$$m^2 = (2^y g)^2 = 2^{2y} g^2,$$

luego 2 está elevado a una potencia *par* (posiblemente cero) en la factorización prima de m^2 . se sigue entonces que de ser $m^2 = 2n^2$ deberíamos tener dos factorizaciones primas diferentes del mismo número entero, contradiciendo al teorema 3.4.7. Entonces $m^2 \neq 2n^2$. \square

Es claro que la conclusión del ejemplo vale también si nosotros permitimos que alguno de los enteros m o n valga 1. Luego podemos expresar el resultado diciendo que no hay enteros positivos m y n que cumplan

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

o equivalentemente, diciendo que la raíz cuadrada de 2 no puede ser expresada como una fracción m/n .

Una notación conveniente para nuestros propósitos será la siguiente: sean m y n dos enteros positivos, a veces es conveniente escribir la factorización prima de ambos números usando los mismos primos, y los primos que usamos son los que se encuentran en la factorización prima de ambos. Es decir escribimos

$$m = p_1^{e_1} p_2^{e_2} \dots p_r^{e_r}, \quad n = p_1^{f_1} p_2^{f_2} \dots p_r^{f_r}.$$

con $e_i, f_i \geq 0$ para $i = 1, \dots, r$ y e_i o f_i distinto de cero.

Veremos ahora un resultado que se puede deducir fácilmente del Teorema Fundamental de la Aritmética (TFA).

Proposición 3.4.9. Sean $m, n \geq 2$ con

$$m = p_1^{e_1} p_2^{e_2} \dots p_r^{e_r}, \quad n = p_1^{f_1} p_2^{f_2} \dots p_r^{f_r}.$$

donde p_i primo y $e_i, f_i \geq 0$ para $i = 1, \dots, r$.

Entonces $m|n$ si y sólo si $e_i \leq f_i$ para todo i .

Demostración.

(\Rightarrow) Por la descomposición de m es claro que $p^{e_i}|m$. Como $m|n$ entonces $p^{e_i}|n$. Es decir $n = p^{e_i}u$. Es claro por TFA entonces que $e_i \leq f_i$.

(\Leftarrow) Como $e_i \leq f_i$, tenemos que $p^{e_i}|p^{f_i}$, para $1 \leq i \leq r$. Luego

$$p_1^{e_1} p_2^{e_2} \dots p_r^{e_r} | p_1^{f_1} p_2^{f_2} \dots p_r^{f_r}.$$

Es decir $m|n$. □

Ahora veremos que es posible calcular el mcd y el mcm de un par de números sabiendo sus descomposiciones primas.

Proposición 3.4.10. Sean m y n enteros positivos cuyas factorizaciones primas son

$$m = p_1^{e_1} p_2^{e_2} \dots p_r^{e_r}, \quad n = p_1^{f_1} p_2^{f_2} \dots p_r^{f_r}.$$

- a) El mcd de m y n es $d = p_1^{k_1} p_2^{k_2} \dots p_r^{k_r}$ donde, para cada i en el rango $1 \leq i \leq r$, k_i es el mínimo entre e_i y f_i .
- b) El mcm de m y n es $u = p_1^{h_1} p_2^{h_2} \dots p_r^{h_r}$ donde, para cada i en el rango $1 \leq i \leq r$, h_i es el máximo entre e_i y f_i .

Demostración.

a) Sea c tal que $c|n$ y $c|m$, entonces los primos que intervienen en la factorización de c son p_1, \dots, p_r y por lo tanto $c = p_1^{t_1} p_2^{t_2} \dots p_r^{t_r}$. Además, como $c|n$ y $c|m$ tenemos que $t_i \leq e_i, f_i$ y por lo tanto $t_i \leq k_i = \min(e_i, f_i)$. De esto se deduce que $c|p_1^{k_1} p_2^{k_2} \dots p_r^{k_r} = d$. Por otro lado, es claro que $p_1^{k_1} p_2^{k_2} \dots p_r^{k_r}$ divide a m y n y se deduce el resultado.

b) Se deja como ejercicio. □

Observación. La proposición anterior nos puede llevar a pensar que una forma sencilla de encontrar el mcd y mcm es usando la descomposición en factores primos de los números involucrados. Esto, en general, no es así para números grandes: no hay un método eficiente para encontrar la descomposición prima de un número grande. Esencialmente, el mejor método para encontrar un divisor de un número grande es el criterio de la raíz, es decir probando si algún número menor que la raíz del número original lo divide. El criterio de la raíz baja el número de comprobaciones de n a \sqrt{n} y eso no ayuda mucho cuando n es grande.

Ahora bien, ¿qué es un “número grande”? En la actualidad, por ejemplo, con todos los recursos computacionales de que se disponen, no es posible factorizar números de 200 dígitos o más. Por lo tanto, no podríamos encontrar el mcd de dos números de 200 dígitos o más a partir de la factorización prima de ambos. Sin embargo, con el algoritmo de Euclides el mcd de estos números se obtendría en pocos segundos.

Ejemplo. Encontremos el mcd y el mcm de 825 y 385.

Como $825 = 3 \cdot 5^2 \cdot 11$ y $385 = 5 \cdot 7 \cdot 11$, tenemos que

$$\text{mcd}(825, 385) = 5 \cdot 11 = 55, \quad \text{mcm}(825, 385) = 3 \cdot 5^2 \cdot 7 \cdot 11 = 5775.$$

§ Ejercicios

- 1) Sean m, n enteros con $m, n \geq 2$. Probar que, m y n son coprimos si y sólo si no comparten ningún primo en la factorización.

En otras palabras, sean

$$m = p_1^{e_1} p_2^{e_2} \dots p_r^{e_r}, \quad n = q_1^{f_1} q_2^{f_2} \dots q_s^{f_s},$$

las descomposiciones primas de m y n con $e_i, f_j > 0$. Entonces $\text{mcd}(m, n) = 1$ si y sólo si con $p_i \neq q_j$ para todos los i, j .

- 2) Probar que si m y n son enteros positivos, tales que $m \geq 2$ y $n \geq 2$, y $m^2 = kn^2$, entonces k es el cuadrado de un entero.
- 3) Usar la identidad

$$2^{rs} - 1 = (2^r - 1)(2^{(s-1)r} + 2^{(s-2)r} + \dots + 2^r + 1)$$

para probar que si $2^n - 1$ es primo, entonces n es primo.

- 4) Encontrar el mínimo n para el cual la recíproca del ejercicio anterior es falsa: esto es, n es primo pero $2^n - 1$ no lo es.
- 5) Para $n \in \mathbb{N}$ sea q_n el factor primo más pequeño de $n! + 1$.

- a)* Probar que $q_n > n$.
- b)* Probar, usando el resultado del item anterior, que existen infinitos números primos (demostración de Hermite).

ARITMÉTICA MODULAR

4.1 CONGRUENCIAS

Una de las más familiares particiones de un conjunto es la partición de \mathbb{Z} en enteros pares y enteros impares. Es decir \mathbb{Z} es la unión disjunta del conjunto de números pares y el de los números impares. Es claro que dos números a, b tienen la misma paridad si $a - b$ es divisible por 2. Para expresar este hecho es usual la notación

$$a \equiv b \pmod{2}$$

y se dice que a es *congruente* a b *módulo* 2. Es decir a y b son ambos pares o ambos impares si y solo si a es congruente a b módulo 2.

Claramente esta definición se puede extender a cualquier entero positivo m .

Definición 4.1.1. Sean a y b enteros y m un entero positivo. Diremos que a es *congruente* a b *módulo* m , y escribimos

$$a \equiv b \pmod{m}$$

si $a - b$ es divisible por m , o, escrito de otra forma, $m|a - b$.

Observar que $a \equiv 0 \pmod{m}$ si y sólo si $m|a$ y que $a \equiv b \pmod{m}$ si y sólo si $a - b \equiv 0 \pmod{m}$.

Notación. $a \equiv b \pmod{m}$ también lo denotamos $a \equiv b \pmod{m}$.

Ejemplo. Algunos ejemplos numéricos:

- $7 \equiv 3 \pmod{2}$, pues $2|7 - 3 = 4$.
- $17 \equiv 8 \pmod{3}$, pues $3|17 - 8 = 9$.
- $8 \equiv 17 \pmod{3}$, pues $3|8 - 17 = -9$.
- $35 \equiv 13 \pmod{11}$, pues $11|35 - 13 = 22 = 2 \cdot 11$.

Proposición 4.1.2. Sean a entero y m un entero positivo. Sea r el resto de dividir a por m , entonces

$$a \equiv r \pmod{m}.$$

Demostración. $a = mq + r$ con $0 \leq r < m$. Luego,

$$a - r = mq \Rightarrow m|a - r \Rightarrow a \equiv r \pmod{m}.$$

□

Es fácil verificar que la congruencia módulo m es una relación de equivalencia.

Proposición 4.1.3. Sea m entero positivo y $x, y, z \in \mathbb{Z}$. Entonces la relación de congruencia es

- a) reflexiva, es decir $x \equiv x \pmod{m}$,
- b) simétrica, es decir si $x \equiv y \pmod{m}$, entonces $y \equiv x \pmod{m}$, y
- c) transitiva, es decir si $x \equiv y \pmod{m}$ e $y \equiv z \pmod{m}$, entonces $x \equiv z \pmod{m}$.

Demostración. Las tres propiedades son sencillas de demostrar y se deducen de propiedades de “divide a”.

- a) $m|x - x = 0$ y por lo tanto $x \equiv x \pmod{m}$.
- b) $x \equiv y \pmod{m} \Rightarrow m|x - y \Rightarrow m|-(x - y) \Rightarrow m|y - x \Rightarrow y \equiv x \pmod{m}$.
- c) $x \equiv y \pmod{m} \wedge y \equiv z \pmod{m} \Rightarrow m|x - y \wedge m|y - z \Rightarrow$
 $m|(x - y) + (y - z) = x - z \Rightarrow x \equiv z \pmod{m}.$

□

□

Observación. Dado un conjunto X una relación que cumple las propiedades de ser reflexiva, simétrica y transitiva es llamada una *relación de equivalencia*.

Ejemplos de relación de equivalencia son la igualdad y el paralelismo de rectas. Veremos otra relación de equivalencia en el capítulo de grafos.

Por la proposición 4.1.2 y por ser “congruencia módulo m ” una relación de equivalencia se deduce el siguiente resultado.

Proposición 4.1.4. Sean a y b enteros y m un entero positivo. Entonces $a \equiv b \pmod{m}$ si y sólo si a y b tienen el mismo resto en la división por m .

Demostración. (\Rightarrow) Si $a = mh + r$ y $b = mk + s$, con $0 \leq r, s < m$, entonces por la proposición 4.1.2 tenemos que

$$a \equiv r \pmod{m} \quad \wedge \quad b \equiv s \pmod{m}.$$

Por la propiedad transitiva de “congruencia módulo m ”, $r \equiv s \pmod{m}$, luego $p|r - s$. Podemos suponer, sin pérdida de generalidad, que $s \leq r$, luego $0 \leq r - s < m$, lo cual implica que $r - s = 0$, es decir $r = s$.

(\Leftarrow) Si a y b tienen el mismo resto en la división por m , entonces $a = mh + r$ y $b = mk + r$, luego $a - b = m(h - k)$ que es divisible por m . \square

Así como antes podíamos separar \mathbb{Z} en los números pares e impares, la propiedad anterior nos permite expresar \mathbb{Z} como una unión disjunta de m subconjuntos. Es decir si $\mathbb{Z}_{[r]} = \{x \in \mathbb{Z} : \text{el resto de dividir } x \text{ por } m \text{ es } r\}$, entonces dado $m \in \mathbb{N}$,

$$\mathbb{Z} = \mathbb{Z}_{[0]} \cup \mathbb{Z}_{[1]} \cup \cdots \cup \mathbb{Z}_{[m-1]}.$$

La utilidad de las congruencias reside principalmente en el hecho de que son compatibles con las operaciones aritméticas. Específicamente, tenemos el siguiente teorema.

Teorema 4.1.5. *Sea m un entero positivo y sean x_1, x_2, y_1, y_2 enteros tales que*

$$x_1 \equiv x_2 \pmod{m}, \quad y_1 \equiv y_2 \pmod{m}.$$

Entonces

- a) $x_1 + y_1 \equiv x_2 + y_2 \pmod{m}$,
- b) $x_1 y_1 \equiv x_2 y_2 \pmod{m}$,
- c) Si $x \equiv y \pmod{m}$ y $j \in \mathbb{N}$, entonces $x^j \equiv y^j \pmod{m}$.

Demostración. La hipótesis nos dice que

$$m|x_1 - x_2 \quad \wedge \quad m|y_1 - y_2.$$

a) Como $m|x_1 - x_2$ y $m|y_1 - y_2$, entonces

$$m|(x_1 - x_2) + (y_1 - y_2) = (x_1 + y_1) - (x_2 + y_2).$$

Es decir, $x_1 + y_1 \equiv x_2 + y_2 \pmod{m}$.

b) Aquí tenemos,

$$\begin{aligned} m|x_1 - x_2 \wedge m|y_1 - y_2 &\Rightarrow m|(x_1 - x_2)y_1 \wedge m|x_2(y_1 - y_2) \\ &\Rightarrow m|(x_1 - x_2)y_1 + x_2(y_1 - y_2) \\ &\Rightarrow m|x_1 y_1 - x_2 y_1 + x_2 y_1 - x_2 y_2 \\ &\Rightarrow m|x_1 y_1 - x_2 y_2. \end{aligned}$$

Luego $x_1 y_1 \equiv x_2 y_2 \pmod{m}$.

c) Lo haremos por inducción sobre j .

Es claro que si $j = 1$ el resultado es verdadero. Supongamos ahora que el resultado vale para $j - 1$, es decir que si $x \equiv y \pmod{m}$, entonces

$$x^{j-1} \equiv y^{j-1} \pmod{m}.$$

Como $x \equiv y \pmod{m}$, por (b) tenemos que

$$x^{j-1}x \equiv y^{j-1}y \pmod{m},$$

es decir

$$x^j \equiv y^j \pmod{m}.$$

□

Veremos ahora una aplicación interesante de las congruencias y sus propiedades.

Proposición 4.1.6. Sea $(x_n x_{n-1} \dots x_0)_{10}$ la representación del entero positivo x en base 10, entonces

$$x \equiv x_0 + x_1 + \dots + x_n \pmod{9}$$

Demostración. Observemos primero que como $10 \equiv 1 \pmod{9}$, entonces $10^k \equiv 1^k \equiv 1 \pmod{9}$. Esto es debido al teorema 4.1.5 c)

Por la definición de representación en base 10, tenemos que

$$x = x_0 + 10x_1 + \dots + 10^n x_n,$$

por el párrafo anterior y teorema 4.1.5 b) obtenemos que $x_k 10^k \equiv x_k \pmod{9}$ y por teorema 4.1.5 a) se deduce que $x \equiv x_0 + x_1 + \dots + x_n \pmod{9}$. □

Corolario 4.1.7. Sea $(x_n x_{n-1} \dots x_0)_{10}$ la representación del entero positivo x en base 10, entonces x es divisible por 9 si y solo si $x_0 + x_1 + \dots + x_n$ es divisible por 9.

Demostración.

$$\begin{aligned} 9|x &\Leftrightarrow 0 \equiv x \pmod{9} \\ &\Leftrightarrow 0 \equiv x_0 + x_1 + \dots + x_n \pmod{9} \quad (\text{prop. 4.1.6 y transitividad}) \\ &\Leftrightarrow 9|x_0 + x_1 + \dots + x_n. \end{aligned}$$

□

El procedimiento anterior a veces es llamado *regla del nueve*.

Ejemplo. Usando la regla del 9 es sencillo verificar que $X = 3475682568$ es divisible por 9, pues

$$3 + 4 + 7 + 5 + 6 + 8 + 2 + 5 + 6 + 8 = 54$$

y como $5 + 4 = 9$ es divisible por 9, también lo es 54 y, luego, también lo es x .

También la proposición 4.1.6 es útil para verificar si una multiplicación larga es incorrecta.

Ejemplo. Verifiquemos el siguiente cálculo

$$54\,321 \cdot 98\,765 = 5\,363\,013\,565.$$

Demostración. En la notación de la proposición 4.1.6 escribamos Σx en vez de

$$\sum_{i=0}^n x_i = x_0 + x_1 + \cdots + x_n.$$

Hemos visto que $\Sigma x \equiv x \pmod{9}$. Por la parte *b)* del teorema 4.1.5 tenemos

$$\Sigma x \cdot \Sigma y \equiv xy \pmod{9},$$

y por consiguiente si $xy = z$ debemos tener $\Sigma x \cdot \Sigma y \equiv \Sigma z \pmod{9}$. En el cálculo que se tiene en el ejemplo

$$\Sigma 54\,321 = 15, \quad \Sigma 98\,765 = 35, \quad \Sigma 5\,363\,013\,565 = 37,$$

y

$$\Sigma 15 = 6, \quad \Sigma 35 = 8, \quad \Sigma 37 = 10.$$

Puesto que $6 \cdot 8$ no es congruente a 10 (mód 9) se sigue que $15 \cdot 35$ no es congruente a 37 (mód 9) y que $54\,321 \cdot 98\,765$ no es congruente a $5\,363\,013\,565$ (mód 9). En consecuencia el cálculo está errado. \square

También a esta verificación suele llamársela la regla del 9. Observar que esta última aplicación solo sirve para comprobar que una multiplicación es incorrecta, y no es útil para verificar que una multiplicación es correcta, pues $xy \equiv z \pmod{9}$ no garantiza que $xy = z$.

§ Ejercicios

1) Sin hacer ninguna “multiplicación larga” probar que

$$a) 1\,234\,567 \cdot 90\,123 \equiv 1 \pmod{10}$$

$$b) 2468 \cdot 13579 \equiv -3 \pmod{25}$$

- 2) Usar la regla del nueve para verificar que dos de las siguientes ecuaciones son falsas. ¿Qué se puede decir de la otra ecuación?

$$a) 5783 \cdot 40162 = 233256846,$$

$$b) 9787 \cdot 1258 = 12342046,$$

$$c) 8901 \cdot 5743 = 52018443.$$

- 3) Encontrar el resto de dividir 3^{15} por 17 y el de dividir 15^{81} por 13.
 4) Sea $(x_n x_{n-1} \dots x_0)_{10}$ la representación en base 10 de un entero positivo x .

- a) Probar que

$$x \equiv x_0 - x_1 + x_2 + \dots + (-1)^n x_n \pmod{11}.$$

- b) Enuncie la *regla del 11*.

- c) Probar que 1213141516171819 es divisible por 11.

- 5) ¿Cuál es el último dígito de la representación en base 10 de 7^{93} .
 6) Usar que $1001 = 7 \cdot 11 \cdot 13$ para construir una prueba para la división simultánea por los números 7, 11 y 13, similar a la prueba del 9.
 7) Si m coprimo con n , entonces $ma \equiv mb \pmod{n}$ si y solo si $a \equiv b \pmod{m}$.

4.2 ECUACIÓN LINEAL DE CONGRUENCIA

Se trata primero de estudiar en general el problema de resolución de la ecuación en x

$$ax \equiv b \pmod{m}. \quad (4.2.1)$$

Es fácil ver que el problema no admite siempre solución, por ejemplo $2x \equiv 3 \pmod{2}$ no posee ninguna solución en \mathbb{Z} , pues cualquiera sea $k \in \mathbb{Z}$, $2k - 3$ es impar, luego no es divisible por 2.

Notemos además que si x_0 es solución de la ecuación (4.2.1), también lo es $x_0 + km$ de manera que si la ecuación posee una solución, posee infinitas soluciones. Para evitar la ambigüedad de infinitas soluciones, nos limitaremos a considerar las soluciones tales que $0 \leq x < m$.

Ejemplo. La solución general de la ecuación $3x \equiv 7 \pmod{11}$ es $6 + k7$ con $k \in \mathbb{Z}$.

Demostración. Si probamos con los enteros x tal que $0 \leq x < 11$, veremos que la ecuación admite una única solución, a saber $x = 6$. Otras soluciones se obtienen tomando $6 + 11k$. Por otra parte si u es también solución de la ecuación, se tiene $3u \equiv 3 \cdot 6 \pmod{11}$, por lo tanto $3(u - 6)$ es múltiplo de 11. Como 11 no divide a 3 se tiene que $11|(u - 6)$, o sea $u = 6 + 11k$. \square

Analícemos ahora la situación general de la ecuación $ax \equiv b \pmod{m}$. Si $\text{mcd}(a, m) = 1$, entonces sabemos que existen enteros r y s tales que $1 = ra + sm$ y por lo tanto $b = (rb)a + (sb)m$, o sea que

$$a(rb) \equiv b \pmod{m},$$

es decir rb es solución de la ecuación. Veremos que el caso general se hace en forma análoga a lo anterior.

Teorema 4.2.1. Sean a, b números enteros y m un entero positivo y denotemos $d = \text{mcd}(a, m)$. La ecuación

$$ax \equiv b \pmod{m} \tag{4.2.2}$$

admite solución si y sólo si $d|b$, y en este caso dada x_0 una solución, todas las soluciones son de la forma

$$x = x_0 + kn, \quad \text{con } k \in \mathbb{Z} \text{ y } n = \frac{m}{d}$$

Demostración. Como $d = \text{mcd}(a, m)$, existen $r, s \in \mathbb{Z}$ tales que

$$d = ra + sm.$$

Si $d|b$, entonces existe $h \in \mathbb{Z}$ tal que $b = dh$. Si multiplicamos por h la ecuación de arriba obtenemos

$$dh = (rh)a + (sh)m.$$

Luego $a(rh) \equiv a(rh) + (sh)m \equiv dh \equiv b \pmod{m}$, y por lo tanto rh es solución de la ecuación lineal de congruencia.

Por otro lado si $ax \equiv b \pmod{m}$, entonces $ax - b = km$ para algún k , o sea

$$b = ax + (-k)m$$

de la cual se sigue que si $d|a$ y $d|m$, entonces $d|b$ y por lo tanto $\text{mcd}(a, m)|b$.

Por lo tanto hemos demostrado que la condición necesaria y suficiente para que la ecuación $ax \equiv b \pmod{m}$ admita una solución es que $\text{mcd}(a, m)|b$.

En el caso que $d|b$ veamos ahora cuales son todas las soluciones posibles de la ecuación (4.2.2). Sean x_1, x_2 soluciones, es decir

$$\begin{aligned} ax_1 &\equiv b \pmod{m} \\ ax_2 &\equiv b \pmod{m}, \end{aligned}$$

entonces, restando miembro a miembro, obtenemos

$$ax_1 - ax_2 \equiv b - b \equiv 0 \pmod{m}.$$

Es decir, x_1, x_2 son soluciones de la ecuación (4.2.2) si y sólo si $y = x_1 - x_2$ es solución de la ecuación lineal de congruencia

$$ay \equiv 0 \pmod{m}.$$

Si $\text{mcd}(a, m) = 1$ es claro que la ecuación $ay \equiv 0 \pmod{m}$ tiene como solución todos los y tales que $m|ay$. Como m y a son coprimos, las soluciones son todos los y tal $m|y$, es decir todos los múltiplos de m .

Si $\text{mcd}(a, m) = d > 1$, la ecuación $ay \equiv 0 \pmod{m}$ tiene como solución todos los y tales que $ay = mk$ para algún k . Si dividimos por d , podemos decir que las soluciones son todos los y tales que $(a/d)y = (m/d)k$, es decir todos los y tal que $(m/d)|(a/d)y$. Como m/d y a/d son coprimos, las soluciones son todos los múltiplos de m/d .

Sean x_0 y x tal que $ax_0 \equiv b \pmod{m}$ y $ax \equiv b \pmod{m}$, entonces $a(x_0 - x) \equiv 0 \pmod{m}$ y por lo tanto $x_0 - x = kn$ para algún k . Es decir, cualquier x que es solución lineal de congruencia es de la forma $x_0 = x + kn$ para algún k . \square

De las demostraciones podemos obtener un método general para encontrar soluciones de la ecuación lineal de congruencia

$$ax \equiv b \pmod{m}.$$

con $\text{mcd}(a, m)|b$

a) Encontrar, usando el algoritmo de Euclides, r, s tales que

$$d = \text{mcd}(a, m) = ra + sm. \quad (4.2.3)$$

b) Como $d|b$, tenemos que $b = td$ y multiplicamos la ecuación (4.2.3) por t :

$$dt = (rt)a + (st)m.$$

c) $b = dt = (rt)a + (st)m \equiv (rt)a \pmod{m}$.

Luego $x_0 = rt$ es solución de la ecuación lineal de congruencia.

- d) Toda solución de la ecuación lineal de congruencia es $x = x_0 + k(m/d)$ con $k \in \mathbb{Z}$.

Observemos que, en las hipótesis del teorema, si $\text{mcd}(a, m) = 1$, entonces siempre existen soluciones a la ecuación $ax \equiv b \pmod{m}$ y todas las soluciones son de la forma $x_0 + km$, donde x_0 es una solución particular. Más aún, debido a esto, hay una única solución x , con $0 \leq x < m$.

Ejemplo. Hallemos las soluciones de la ecuación $13x \equiv 7 \pmod{15}$ con $0 \leq x < 15$.

Demostración. Hagamos, paso a paso, el procedimiento explicado anteriormente.

- a) Usando el algoritmo de Euclides obtenemos el $\text{mcd}(13, 15)$.

$$15 = 13 \cdot 1 + 2$$

$$13 = 2 \cdot 6 + 1$$

$$2 = 1 \cdot 2 + 0$$

Luego $1 = \text{mcd}(13, 15)$. Como 1 divide a cualquier número, en este caso la ecuación tiene solución. Del algoritmo de Euclides deducimos

$$\begin{aligned} 1 &= 13 - 2 \cdot 6 \\ &= 13 - (15 - 13) \cdot 6 \\ &= 13 \cdot 7 - 15 \cdot 6. \end{aligned}$$

Es decir

$$1 = 13 \cdot 7 - 15 \cdot 6. \quad (4.2.4)$$

- b) Multiplicando la ecuación (4.2.4) por 7 obtenemos

$$7 = 13 \cdot 49 - 15 \cdot 42.$$

- c) Luego $13 \cdot 49 \equiv 7 \pmod{15}$, es decir 49 es solución de la ecuación.

- d) Todas las soluciones son de la forma $x = 49 + 15k$.

Debemos ver ahora cuales soluciones x cumplen $0 \leq x < 15$. La forma más sencilla de hacerlo es buscando por tanteo: $49 + 15(-1) = 34$, $49 + 15(-2) = 19$, $49 + 15(-3) = 4$, $49 + 15(-4) = -11$. Es decir la solución que buscamos es $x = 4$. \square

Ejemplo. Hallemos las soluciones de la ecuación $42x \equiv 50 \pmod{76}$ con $0 \leq x < 76$.

Demostración. Como antes, hagamos paso a paso el procedimiento explicado anteriormente.

a) Usando el algoritmo de Euclides obtenemos el $\text{mcd}(42, 76)$.

$$76 = 42 \cdot 1 + 34$$

$$42 = 34 \cdot 1 + 8$$

$$34 = 8 \cdot 4 + 2$$

$$8 = 2 \cdot 4$$

Luego $2 = \text{mcd}(42, 76)$. Como $2 \mid 50$ la ecuación tiene solución. Del algoritmo de Euclides deducimos

$$\begin{aligned} 2 &= 34 - 8 \cdot 4 \\ &= 34 - (42 - 34) \cdot 4 = 34 \cdot 5 - 42 \cdot 4 \\ &= (76 - 42) \cdot 5 - 42 \cdot 4 \\ &= 76 \cdot 5 - 42 \cdot 9. \end{aligned}$$

Es decir

$$2 = (-9) \cdot 42 + 5 \cdot 76.$$

b) $50 = 2 \cdot 25$ y tenemos que

$$\begin{aligned} 50 &= (-9 \cdot 25) \cdot 42 + (5 \cdot 25) \cdot 76 \\ 50 &= (-225) \cdot 42 + 125 \cdot 76 \end{aligned}$$

c) Luego $x_0 = -225$ es una solución de la ecuación lineal de congruencia.

d) Todas las soluciones son de la forma $-225 + (76/2)k$, es decir $x = -225 + 38k$.

Debemos ver ahora cuales soluciones x cumplen $0 \leq x < 76$. Como en el caso anterior podemos hacer esto por tanteo, pero aquí la forma más sencilla de hacerlo es escribir las inecuaciones

$$\begin{aligned} 0 &\leq -225 + 38k < 76 \\ 225 &\leq 38k < 76 + 225 = 301 \\ 225/38 &\leq k < 301/38 \\ 5.9 &\leq k < 7.9 \end{aligned}$$

Luego $k = 6$ o $k = 7$ y entonces $x_1 = -225 + 38 \cdot 6 = 3$ y $x_2 = -225 + 38 \cdot 7 = 41$ son las soluciones que buscamos. \square

§ Ejercicios

1) Resolver las siguientes ecuaciones lineales de congruencia

- a) $2x \equiv 1 \pmod{7}$.
 b) $3970x \equiv 560 \pmod{2755}$.
- 2) Determinar todas las posibles soluciones de las congruencias
- a) $5x \equiv 1 \pmod{11}$,
 b) $5x \equiv 7 \pmod{15}$.
- 3) Resolver la ecuaciones
- a) $5x \equiv 12 \pmod{13}$,
 b) $x^2 - x \equiv 1 \pmod{11}$.
- 4) Sea m un número entero ≥ 2 y sea

$$\mathbb{Z}_m := \{0, 1, \dots, m-1\}$$

el conjunto de restos de dividir por m . En \mathbb{Z}_m definimos suma y producto de la siguiente manera: sean $a, b \in \mathbb{Z}_m$, entonces

$$\begin{aligned} a + b &= c & \text{si} & \quad a + b \equiv c \pmod{m} \quad \wedge \quad 0 \leq c \leq m-1, \\ a \cdot b &= d & \text{si} & \quad a \cdot b \equiv d \pmod{m} \quad \wedge \quad 0 \leq d \leq m-1. \end{aligned}$$

- a) Probar que \mathbb{Z}_m es un *anillo conmutativo con unidad*, es decir se cumplen los axiomas **I1**, ..., **I6** de la sección 1.1 (cambiando \mathbb{Z} por \mathbb{Z}_m).
- b) Probar que si p es un número primo, entonces \mathbb{Z}_p es *cuerpo*, es decir se cumplen los axiomas **I1**, ..., **I6** de la sección 1.1 y además, para todo $a \in \mathbb{Z}_p$, $a \neq 0$, existe $b \in \mathbb{Z}_p$ tal que $ab = 1$.

4.3 TEOREMA DE FERMAT

El siguiente lema nos sirve de preparación para la demostración del Teorema (o fórmula) de Fermat.

Lema 4.3.1. Sea p un número primo, entonces

- a) $p \mid \binom{p}{r}$, con $0 < r < p$,
 b) $(a + b)^p \equiv a^p + b^p \pmod{p}$.

Demostración.

a) Escribamos el número binomial de otra forma:

$$\binom{p}{r} = \frac{p!}{r!(p-r)!} = p \cdot \frac{(p-1)!}{r!(p-r)!}$$

es un número entero, digamos k , luego

$$k \cdot r!(p-r)! = p \cdot (p-1)! \quad (4.3.1)$$

Como $p-1$, r y $p-r$ son menores que p , entonces $(p-1)!$, $r!$ y $(p-r)!$ son producto de números menores que p y por lo tanto son producto de primos menores que p . Por lo tanto, el primo p no aparece en la descomposición prima de $(p-1)!$, $r!$ y $(p-r)!$. Por la igualdad de la ecuación (4.3.1), p debe ser factor de $k = \binom{p}{r}$, luego $p | \binom{p}{r}$.

b) Por el teorema del binomio (teorema 2.5.1) sabemos que

$$(a+b)^p = \sum_{i=0}^p \binom{p}{i} a^i b^{p-i}.$$

Por *a)* es claro que $\binom{p}{i} a^i b^{p-i} \equiv 0 \pmod{p}$, si $0 < i < p$. Luego se deduce el resultado. \square

El siguiente es el llamado teorema de Fermat.

Teorema 4.3.2. *Sea p un número primo y a número entero. Entonces*

$$a^p \equiv a \pmod{p}.$$

Demostración. Supongamos que $a \geq 0$, entonces hagamos inducción en a . Si $a = 0$, el resultado es trivial. Supongamos el resultado probado para k , es decir $k^p \equiv k \pmod{p}$. Entonces $(k+1)^p \equiv k^p + 1^p \equiv k+1 \pmod{p}$. La primera congruencia es debido al lema 4.3.1 *b)* y la segunda es válida por hipótesis inductiva. Luego $a^p \equiv a \pmod{p}$ cuando $a > 0$.

Si $a < 0$, entonces $-a > 0$ y ya vimos que $(-a)^p \equiv -a \pmod{p}$, es decir que $(-1)^p a^p \equiv (-1)a \pmod{p}$. Si $p \neq 2$, entonces $(-1)^p = -1$ y se deduce el resultado. Si $p = 2$, entonces $(-1)^p = 1$, pero como $1 \equiv -1 \pmod{2}$, obtenemos también $a^p \equiv a \pmod{p}$. \square

Corolario 4.3.3. *Sea p primo y a entero tal $p \nmid a$, entonces $a^{(p-1)} \equiv 1 \pmod{p}$.*

Demostración. Por Fermat $a^p \equiv a \pmod{p}$, es decir

$$p | (a^p - a) = a(a^{(p-1)} - 1).$$

Como p no divide a a , tenemos que $p | (a^{(p-1)} - 1)$ (teorema 3.4.6), es decir $a^{(p-1)} \equiv 1 \pmod{p}$. \square

Este último corolario es también conocido como teorema de Fermat.

La función de Euler $\phi(n)$, para $n \geq 1$, está definida como el cardinal del conjunto de los x entre 1 y n que son coprimos con n . El teorema de Fermat admite la siguiente generalización.

Teorema 4.3.4 (Teorema de Euler). *Sea n un entero positivo y a un número entero coprimo con n , entonces*

$$a^{\phi(n)} \equiv 1 \pmod{n}.$$

Demostración. Ver ejercicios 2 y 3, a continuación. □

§ Ejercicios

- 1) Usar el teorema de Fermat para calcular el resto de dividir 3^{47} por 23.
- 2) Sean x_1, \dots, x_k los números coprimos con n comprendidos entre 1 y n (es decir $k = \phi(n)$) y sea y coprimo con n . Entonces hay un reordenamiento de yx_1, \dots, yx_k , es decir una permutación σ de $1, \dots, k$, tal que $x_i \equiv yx_{\sigma_i} \pmod{n}$, para $1 \leq i \leq k$. [Ayuda: como y coprimo con n , existe v tal que $yv \equiv 1 \pmod{n}$].
- 3) Demostrar el teorema de Euler. [Ayuda: Sean x_1, \dots, x_k los números coprimos con n comprendidos entre 1 y n , por el ejercicio anterior $y^{\phi(n)}x_1 \dots x_k = yx_1 \dots yx_k \equiv x_1 \dots x_k \pmod{n}$. Como $u = x_1 \dots x_k$ coprimo con n , existe v tal que $uv \equiv 1 \pmod{n}$].

4.4 EL CRIPTOSISTEMA RSA

Una de las aplicaciones más elementales y difundidas de la aritmética es en el diseño de sistemas criptográficos. El RSA es el más conocido de ellos y será presentado en esta sección.

Por criptosistema nos referimos a sistemas de encriptamiento o codificación esencialmente pensados para proteger la confidencialidad de datos que se desean transmitir. Entre los criptosistemas encontramos los simétricos y los de clave pública o asimétricos.

Los sistemas criptográficos simétricos son aquellos en que tanto el emisor como el receptor conocen una función, digamos f y una palabra, digamos x (la clave), tanto la función como la clave deben ser confidenciales o más comúnmente solo la clave debe ser confidencial. Cuando el emisor desea enviar un mensaje M , entonces aplica la función a M y x , es decir $M' = f(M, x)$, envía M' y el receptor aplica la función inversa y recupera M , es decir $M = f^{-1}(M', x)$. Es llamada *simétrica* porque tanto el emisor como el receptor manejan las mismas claves y el emisor puede pasar a receptor y viceversa usando la misma encriptación.

En los sistemas de clave pública el receptor conoce una clave privada y (no compartida por nadie) y publicita una clave pública x , de la misma manera que antes, si alguien desea enviar un mensaje M al receptor debe hacer $M' = f(M, x)$, pero el receptor para decodificar debe hacer $M = g(M', y)$, donde g es una función adecuada. Una ventaja evidente de los sistemas de clave pública es que no es necesario poner en conocimiento del emisor ninguna clave confidencial, más aún cualquier persona puede enviar en forma confidencial datos a otra persona que ha publicitado su clave.

Rivest, Shamir y Adleman descubrieron el primer criptosistema práctico de clave pública, que es llamado RSA. La seguridad del RSA se basa en la dificultad de factorizar números enteros grandes. Este sistema es el más comúnmente recomendado para uso en sistemas de clave pública. La mayor ventaja del RSA es que puede ser usado para proveer privacidad y autenticación (firma digital) en las comunicaciones. Su principal desventaja es que su implementación se basa en exponenciación de números enteros grandes, una operación que consume recursos de la computadora, aunque esto es cada vez menos significativo.

Antes de describir el RSA digamos que se basa fuertemente en el teorema de Fermat visto en la sección anterior.

En el sistema RSA deben realizarse algunos pasos previos para fijar ciertos parámetros que luego nos permitirán encriptar y desencriptar los mensajes.

Idea del algoritmo

Supongamos que la persona B quiere enviar a la persona A un mensaje m pero encriptado de tal forma que sólo A pueda leer su contenido. Por su parte A hace públicos dos números e y n que son los que se utilizarán para encriptar los mensajes que le envíen.

Entonces a partir de m la persona B genera un mensaje cifrado c mediante la siguiente operación:

$$c \equiv m^e \pmod{n},$$

donde e y n es la clave pública de A.

Ahora A recupera el mensaje m a partir del mensaje en clave c mediante la operación inversa dada por

$$m \equiv c^d \pmod{n},$$

donde d es la clave privada que sólo A conoce.

Elección de claves

Sean p y q primos distintos suficientemente .

- La *clave pública* es (n, e) con $n = pq$ y e tal que $1 < e < (p-1)(q-1)$ y $\text{mcd}(e, (p-1)(q-1)) = 1$.
- La *clave privada* es un entero d tal que $ed \equiv 1 \pmod{(p-1)(q-1)}$ y $0 \leq d < (p-1)(q-1)$.

Observación. Algunos comentarios sobre la elección de p, q, e, d .

- Los dos primos p y q deberían tener alrededor de 100 dígitos cada uno (longitud considerada segura en este momento).
- El número e puede elegirse pequeño y se selecciona haciendo prueba y error con el algoritmo de Euclides, es decir probando hasta encontrar un e tal que $\text{mcd}(e, (p-1)(q-1)) = 1$.
- La existencia de d está garantizada por el teorema 4.2.1 (ecuación lineal de congruencia), pues e y $(p-1)(q-1)$ son coprimos.

Encriptar y desencriptar mensajes

El receptor de mensajes publicita la clave pública (n, e) . Obviamente no da a conocer ni p , ni q y mantiene segura la clave privada d . Como mencionamos anteriormente, el envío del mensaje y su decodificación requiere dos pasos

- a) El emisor desea *encriptar* un número $m \in \{0, \dots, n-1\}$ y para ello calcula $c \equiv m^e \pmod{n}$ y envía c al receptor.
- b) El receptor desea *desencriptar* el mensaje, es decir usando la clave pública (n, e) y c , desea recuperar m : calcula $c^d \pmod{n}$ y veremos a continuación que este número es m .

Demostración del método

Debemos probar que el método anterior funciona y lo haremos en la siguiente proposición.

Proposición 4.4.1. Sean

- $n = pq$ producto de dos números primos,
- e coprimo con $(p-1)(q-1)$, y

◦ d tal que $ed \equiv 1 \pmod{(p-1)(q-1)}$.

Entonces si $m \in \{0, \dots, n-1\}$,

$$c \equiv m^e \pmod{n} \Rightarrow m \equiv c^d \pmod{n}.$$

Demostración. Como $ed \equiv 1 \pmod{(p-1)(q-1)}$, entonces existe k tal que

$$ed = 1 + k(p-1)(q-1). \quad (4.4.1)$$

Consideremos el mensaje m y si es o no coprimo con p .

Si $\text{mcd}(m, p) = 1$, el Teorema de Fermat dice que $m^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}$. Entonces $(m^{p-1})^x \equiv 1 \pmod{p}$ para cualquier x . En particular, para $x = k(q-1)$. Así que tenemos:

$$m^{k(p-1)(q-1)} = (m^{p-1})^{k(q-1)} \equiv 1 \pmod{p}.$$

Multiplicando esta ecuación por m obtenemos

$$m^{1+k(p-1)(q-1)} \equiv m \pmod{p}. \quad (4.4.2)$$

Usando las ecuaciones (4.4.1) y (4.4.2) obtenemos:

$$m^{ed} \equiv m \pmod{p} \quad (4.4.3)$$

Esto, si $\text{mcd}(m, p) = 1$. Pero si esto último no es cierto, entonces al ser p primo debemos tener $m \equiv 0 \pmod{p}$ y en ese caso la ecuación (4.4.3) es trivial (dice que $0 \equiv 0$). Concuendo, la ecuación (4.4.3) se cumple para todo m .

Obviamente podemos reemplazar p por q en el razonamiento anterior, así que la ecuación (4.4.3) también es verdadera si reemplazamos p por q . De esa forma obtenemos:

$$p \mid (m^{ed} - m) \quad \text{y} \quad q \mid (m^{ed} - m).$$

Como p y q son primos distintos, entonces concluimos que $pq \mid (m^{ed} - m)$, es decir,

$$m^{ed} \equiv m \pmod{pq}.$$

□

Ejemplo. Probemos el sistema en forma práctica usando primos pequeños, por ejemplo $p = 31$, $q = 73$. En este caso $n = pq = 2263$.

Busquemos ahora un e : tenemos que $(p-1)(q-1) = 30 \cdot 72 = 2160$. Vemos que 2, 3, 5 dividen a 2160, pero 7 es coprimo con 2160. Tomemos entonces $e = 7$.

Usando el algoritmo de Euclides obtenemos $1 = 2 \cdot 2160 + (-617) \cdot 7$. Luego, -617 es solución de $7x \equiv 1 \pmod{2160}$, pero como queremos que la solución sea positiva menor que 2160 , podemos tomar $d = 2160 - 617 = 1543$.

Por lo tanto el receptor tiene clave pública $(2263, 7)$ y conserva en secreto su clave privada 1543

- Supongamos que el emisor ha nacido en el año 1993 y quiere enviarle en secreto al receptor su año de nacimiento. Entonces encripta el año haciendo

$$1993^7 \equiv 10 \pmod{2263},$$

y envía, por una vía insegura, por ejemplo un email, el número 1417 al receptor.

- El receptor calcula

$$10^{1543} \pmod{2263}$$

y obtiene nuevamente 1993 (si quiere convencerse de esto ingrese $10^{1543} \bmod 2263$ en la ventana de búsqueda de [Wolfram Alpha](#)).

Pese a que el cálculo de desencriptado (en este caso $10^{1543} \pmod{2263}$) puede parecer costoso computacionalmente, hay métodos eficientes para hacerlo como veremos en la sección 4.5.

Firma digital

Una propiedad importante del RSA es que puede ser usado para firma digital o autenticación. En las hipótesis de la proposición 4.4.1, es claro que lo que probamos es que

$$(m^e)^d \equiv m \pmod{n},$$

para $m \in \{0, \dots, n-1\}$. Ahora bien

$$(m^e)^d = m^{ed} = (m^d)^e,$$

es decir

$$(m^d)^e \equiv m \pmod{n},$$

para $m \in \{0, \dots, n-1\}$. Por lo tanto, el receptor puede codificar un número o mensaje m calculando $b \equiv m^d \pmod{n}$ y cualquiera que conozca la clave pública puede obtener el original calculando $b^e \pmod{n}$.

Lo interesante de esto es que si el receptor envía m (el mensaje) y b (la codificación de m), cualquiera puede comprobar que el mensaje ha sido codificado por el receptor (y no por otra persona) verificando que $m \equiv b^e \pmod{n}$.

Ejemplo. Como ya hemos mencionado, podemos ver que el RSA también puede ser usado para un sistema de *autenticación*, es decir es posible comprobar quien es la persona que envía el mensaje. Veamos una forma de hacerlo: la persona A tiene clave pública (e, n) y clave privada d y la persona B tiene clave pública (e', n') y clave privada d' .

- a) La persona B desea enviar un mensaje m (en forma segura) a la persona A y quiere certificar que el mensaje fue enviado por él.
- b) B calcula $x \equiv m^{d'} \pmod{n'}$. Es decir encripta su mensaje usando su clave privada.
- c) Ahora B codifica m y x con la clave pública de A, es decir calcula $c \equiv m^e \pmod{n}$ e $y \equiv x^e \pmod{n}$.
- d) B envía c e y al receptor A.
- e) La persona A recupera m y x calculando $m \equiv c^d \pmod{n}$ y $x \equiv y^d \pmod{n}$.
- f) A comprueba que el mensaje proviene de B o, mejor dicho, proviene de la persona con clave pública (e', n') , verificando que $m \equiv x^{e'} \pmod{n'}$.

4.5 MÉTODO BINARIO PARA EXPONENCIACION MODULAR (*)

Vimos en la sección anterior que para implementar el criptosistema RSA es esencial tener una forma eficiente de calcular exponenciación modular, es decir tener la capacidad de calcular el resto de dividir por cierto número la potencia muy grande de otro número.

Más explícitamente, sean a, d, n enteros positivos se desea calcular r tal que $a^d \equiv r \pmod{n}$ con $0 \leq r < n$. En otras palabras, se desea calcular el resto de dividir a^d por n . Estaríamos tentados de calcular a^d y luego hacer la congruencia módulo n , pero cuando d es grande, por ejemplo $d > 10^{20}$, este cálculo es imposible para cualquier computador.

Para realizar el cálculo de $a^d \equiv r \pmod{n}$ en forma eficiente podemos utilizar el *método binario de exponenciación modular* que explicaremos a continuación.

Primero, recordemos la definición recursiva de la potencia de un número: sea a número (entero, racional, real, etc.), entonces

$$a^d = \begin{cases} 1 & , \text{ si } d = 0, \\ a \cdot a^{d-1} & , \text{ si } d > 0. \end{cases} \quad (4.5.1)$$

Aplicar esta definición tiene el inconveniente de que si d es un número grande, la cantidad de pasos que se deben realizar para calcular a^d es directamente proporcional (y mayor) a d , número que puede ser inmanejable para una computadora.

Una definición alternativa de las potencias de un número nos permite amuntar d en forma significativa. Sea a número (entero, racional, real, etc.), entonces

$$a^d = \begin{cases} 1 & , \text{ si } d = 0, \\ a \cdot a^{n-1} & , \text{ si } d > 0 \text{ y } d \text{ impar;} \\ (a^2)^{\frac{n}{2}} & , \text{ si } d > 0 \text{ y } d \text{ par.} \end{cases} \quad (4.5.2)$$

Con esta definición la cantidad de operaciones necesarias para calcular la potencia de un número decrece enormemente. Observemos que mientras que con la definición (4.5.1) la cantidad de operaciones es del orden de d , con la definición (4.5.2) la cantidad de operaciones es del orden de $\log_2(d)$.

Ejemplo 4.5.1. Supongamos que queremos calcular 9^{17} . En este caso, podríamos hacer este cálculo directamente, multiplicando 17 veces 9 y así obtenemos 16677181699666569 con 17 multiplicaciones. Este sería el método que se deduce de la definición recursiva (4.5.4).

Probemos con la segunda definición recursiva:

$$\begin{aligned} 9^{17} &= 9 \cdot 9^{16} \\ &= 9 \cdot (9^2)^8 &= 3 \cdot 81^8 \\ &= 9 \cdot (81^2)^4 &= 3 \cdot 6561^4 \\ &= 9 \cdot (6561^2)^2 &= 3 \cdot 43046721^2 \\ &= 9 \cdot 1853020188851841 &= 16677181699666569. \end{aligned} \quad (4.5.3)$$

Es decir, en bastante menos pasos hemos podido calcular 9^{17} .

Pasemos ahora al problema de calcular exponenciación modular.

Supongamos ahora que queremos calcular r tal que

$$5^{1125899986842625} \equiv r \pmod{100000037},$$

y $0 \leq r < 100000037$. Hacer este cálculo directamente no nos da un resultado satisfactorio, ni siquiera con un programa de computadora. Pueden hacer el intento con un lenguaje de programación, Python por ejemplo, y verán que el programa no termina. Esto se debe a que $5^{1125899986842625}$ es un número inmenso cuya representación no cabría en la memoria de ninguna computadora ni actual ni futura. La clave para poder calcular r es usar un análogo a la definición (4.5.2), pero con congruencias. Sea a número entero y sean $d \geq 0$ y $n \geq 1$. Definimos $\%$ el operador módulo de tal forma que $a \% n$

devuelve el resto de dividir a por n . Hay muchas forma de calcular $a^d \% n$, y nosotros elegimos la siguiente forma recursiva:

$$a^d \% n = \begin{cases} 1 & , \text{ si } d = 0, \\ a \cdot (a^{n-1} \% n) \% n & , \text{ si } d > 0 \text{ y } d \text{ impar;} \\ (a^2 \% n)^{\frac{n}{2}} \% n & , \text{ si } d > 0 \text{ y } d \text{ par.} \end{cases} \quad (4.5.4)$$

Esta definición no solo reduce la cantidad de pasos para calcular r , si no que, veremos un poco más adelante, también mantiene la cantidad de dígitos de los cálculos intermedios acotada.

Ejemplo 4.5.2. Sea $n = 23$, calculemos usando la definición 4.5.4, r tal que $9^{17} \equiv r \pmod{23}$ con $0 \leq r < 23$, es decir $9^{17} \% 23$. Apliquemos la definición (4.5.4) y aprovechemos los cálculos hechos en el ejemplo 4.5.1:

$$\begin{aligned} 9^{17} &\equiv 9 \cdot 9^{16} \\ &\equiv 9 \cdot (9^2)^8 &\equiv 9 \cdot 12^8 & \text{(pues } 9^2 \equiv 12 \pmod{23}) \\ &\equiv 9 \cdot (12^2)^4 &\equiv 9 \cdot 6^4 & \text{(pues } 12^2 \equiv 6 \pmod{23}) \\ &\equiv 9 \cdot (6^2)^2 &\equiv 9 \cdot 13^2 & \text{(pues } 6^2 \equiv 13 \pmod{23}) \\ &\equiv 9 \cdot 8 & \text{(pues } 13^2 \equiv 8 \pmod{23}) \\ &\equiv 3 & \text{(pues } 9 \cdot 8 \equiv 3 \pmod{23}). \end{aligned}$$

Es decir, $9^{17} \equiv 3 \pmod{23}$. Observar que pese a que 9^{17} es un número de 17 dígitos, los cálculos que hacemos (módulo 23) involucran pocos dígitos.

Como observamos en el ejemplo, en cada paso donde d es par tenemos que calcular el cuadrado de un número y elevarlo a una potencia que es la mitad que la anterior. Luego, si el exponente es $d < 2^k$ en alrededor de k pasos (unos pocos más en realidad) obtendremos el resultado deseado.

En el caso que habíamos planteado: calcular $5^{1125899986842625} \equiv r \pmod{100000037}$, como $1125899986842625 < 2^{51}$, si lo resolvemos usando el método de la fórmula (4.5.4) necesitaremos poco más de 50 pasos.

La definición (4.5.4) nos muestra como casi inmediatamente podemos obtener una fórmula recursiva para la exponenciación modular: sea $n > 0$, definimos $//$ el *operador cociente* de tal forma que $a // n$ es el cociente entero de dividir a por n . Entonces, nuestro interés es calcular $f(a, d) = a^d \% n$ en forma eficiente y la fórmula (4.5.4) es equivalente a

$$f(a, d) = \begin{cases} 1 & , \text{ si } d = 0, \\ (a \cdot f(a, d-1)) \% n & , \text{ si } d > 0 \text{ y } d \text{ impar;} \\ f(a^2 \% n, d // 2) & , \text{ si } d > 0 \text{ y } d \text{ par.} \end{cases} \quad (4.5.5)$$

Observar que en la definición hay dos $\% n$ que podrían haber sido reemplazados por una instancia de la función f pues $x \% n = f(x, 1)$. Pero, en este

caso, se pueden calcular directamente por el algoritmo de división, pues están aplicados en números considerados “no grandes”.

Esta función recursiva es fácilmente trasladable a pseudocódigo.

EXPONENCIACIÓN MODULAR RECURSIVA

```
def f(a, d):
    if d == 0:
        res = 1
    elif d % 2 == 1:
        res = (a * f(a, d - 1)) % n
    else:
        res = f(a**2 % n, d // 2)
    return res
```

En pseudocódigo una versión iterativa de la exponenciación modular se puede describir de la siguiente forma.

EXPONENCIACIÓN MODULAR

```
def exp_modular(a, d, n):
    res = 1
    base, exponente = a, d
    while exponente > 0:
        # invariante: (a**d) % n = (res * base**exponente) % n
        if exponente % 2 == 1:
            res = (res * base) % n
            exponente = exponente // 2
            base = base**2 % n
        elif exponente % 2 == 0:
            exponente = exponente // 2
            base = base**2 % n
    return res
```

4.6 PRUEBAS DE PRIMALIDAD (*)

En la implementación del criptosistema RSA es fundamental el uso de primos de grandes dimensiones, por ejemplo de más de 100 dígitos. Ahora bien, tratar de demostrar que un número (grande) es primo buscando sus divisores es imposible con una arquitectura de computadoras determinística, como la es la de las computadoras actuales. Justamente en la dificultad de la descomposición prima se basa la fortaleza del criptosistema RSA.

Sin embargo, veremos en esta parte del apunte que hay algoritmos que permiten determinar en forma probabilística si un número es primo o no. También mencionaremos, al final de esta sección, algoritmos que determinan eficientemente y en forma determinística si un número es primo o no.

El algoritmo que veremos principalmente es el test de primalidad Miller-Rabin probabilístico. Como su nombre lo indica es una prueba probabilística de primalidad: un algoritmo que determina si un número dado es probable que sea primo.

Este test es ampliamente utilizado en la práctica (en RSA, por ejemplo) y es una de las pruebas más simples y rápidas conocidas.

Describamos en forma amplia el método del test: dado m un entero positivo.

- Si le hacemos el test a m y no supera la prueba, entonces el número no es primo.
- Si hacemos k veces el test y m supera las k pruebas, entonces m tiene la probabilidad $1 - (1/4^k)$ de ser primo.

El test de Miller-Rabín se basa en comprobar k veces (para un k dado) si el número es fuertemente probable primo respecto a una base. Veamos a continuación las definiciones necesarias para comprender este concepto.

Definición 4.6.1. Sea $n > 2$ un entero impar, entonces $n = 2^s \cdot d + 1$ con d impar. Sea a entero tal que $0 < a < n$. Entonces diremos que n es *fuertemente probable primo (FPP) respecto a la base a* si se cumple

- $a^d \equiv 1 \pmod{n}$, o
- $a^{2^r \cdot d} \equiv -1 \pmod{n}$ para algún r tal que $0 \leq r < s$.

Con la aplicación del teorema de Fermat y la ecuación lineal de congruencia probaremos que todo número primo es FPP respecto a cualquier base. El contrarrecíproco de esta afirmación nos dice que un número que no es FPP respecto a alguna base es compuesto.

Lema 4.6.2. Sea n un primo impar, entonces las únicas raíces cuadradas de 1 modulo n son 1 y -1 . Es decir,

$$x^2 \equiv 1 \pmod{n} \Rightarrow x \equiv \pm 1 \pmod{n}.$$

Demostración. Sea x tal que $x^2 \equiv 1 \pmod{n}$, luego $x^2 - 1 \equiv 0 \pmod{n}$, como $x^2 - 1 = (x - 1)(x + 1)$, obtenemos $(x - 1)(x + 1) \equiv 0 \pmod{n}$. Esto quiere decir que $n \mid (x - 1)(x + 1)$. Como n es primo, $n \mid x - 1$ o $n \mid x + 1$, es decir $x \equiv 1 \pmod{n}$ o $x \equiv -1 \pmod{n}$. \square

Teorema 4.6.3. Si n es un primo impar, entonces n es FPP para cualquier base a con $0 < a < n$.

Demostración. Consideremos la sucesión $a^{2^s \cdot d}, a^{2^{s-1} \cdot d}, \dots, a^{2^1 \cdot d}, a^d$ y observemos que cada término de la sucesión es el cuadrado del siguiente.

Por el teorema de Fermat, $a^{2^s \cdot d} = a^{n-1} \equiv 1 \pmod{n}$. Luego $(a^{2^{s-1} \cdot d})^2 \equiv 1 \pmod{n}$ y por lo tanto $a^{2^{s-1} \cdot d}$ es una raíz cuadrada de 1 módulo n . Por el lema anterior obtenemos que $a^{2^{s-1} \cdot d} \equiv \pm 1 \pmod{n}$.

Si $a^{2^{s-1} \cdot d} \equiv -1 \pmod{n}$, obtenemos el resultado. En caso contrario $a^{2^{s-1} \cdot d} \equiv 1 \pmod{n}$, luego $(a^{2^{s-2} \cdot d})^2 \equiv 1 \pmod{n}$ y por lo tanto $a^{2^{s-2} \cdot d}$ es una raíz cuadrada de 1 módulo n y en consecuencia $a^{2^{s-2} \cdot d} \equiv \pm 1 \pmod{n}$.

Iterando el razonamiento anterior concluimos que alguno de los términos de la sucesión $a^{2^r \cdot d}$ es congruente a -1 módulo n o bien todos los términos son congruentes a 1, en particular $a^d \equiv 1 \pmod{n}$, con lo cual n resulta ser probable primo fuerte. \square

Ahora bien, también es cierto el recíproco (que no demostraremos): un número n que es FPP respecto a todas las bases $0 < a < n$ es primo. Podríamos intentar ver que un número es primo probando que es FPP para cualquier base, pero este cálculo es computacionalmente imposible para primos grandes.

Por otro lado, un número n que es FPP respecto alguna base $0 < a < n$ podría ser compuesto, pero hay una probabilidad mayor que 0.75 de que sea primo. La verificación con diferentes bases de que un número es FPP acerca a 1 la probabilidad de que el número sea primo.

El test probabilístico de primalidad de Miller-Rabin se basa en las observaciones realizadas más arriba: sea n entero positivo impar y sea k entero positivo.

- (1) Elegir al azar a entero tal que $0 < a < n$.
- (2) Verificar que n es FPP respecto a la base a .
- (3) Repetir (1) y (2) k veces.

Si n es FPP las k veces, entonces decimos que n supera el test probabilístico de primalidad de Miller-Rabin y tiene probabilidad $1 - (1/4^k)$ de ser primo (y lo consideramos primo).

Mostramos a continuación una implementación en pseudocódigo.

TEST DE PRIMALIDAD DE MILLER-RABIN

```

def test_Miller_Rabin(n: int, k: int) -> bool:
    s, d = satisfacen n = 2**s * d + 1, s impar
    repetir k veces:
        a = entero al azar entre 2 y n-1
        fpp = False # suponemos n no es fuertemente primo en base a
        if 1 == a**d % n:
            fpp = True
        else:
            r = 0
            while r <= s and fpp == False:
                if n - 1 == a**(2**r * d) % n:
                    fpp = True
                r = r + 1
            if fpp == False: # si n no pasa la prueba
                return False
    return True # n pasó las k pruebas

```

Observemos que el test de primalidad de Miller-Rabin hace uso de la exponenciación modular y por lo tanto debe ser implementado usando el método binario de exponenciación modular.

El test de Miller-Rabin probabilístico se deriva del test de Miller: asumiendo que es válida la Hipótesis de Riemman, sea n entero positivo, si comprobamos que n es FPP en base a con $2 < a < 2 \ln(n)^2$, entonces n es primo.

El test de Miller no se utiliza en la práctica. Para la mayoría de los propósitos, el uso adecuado de la prueba probabilística de Miller-Rabin es mucho más rápida y brinda suficiente seguridad del resultado. Para fines teóricos que requieren un algoritmo de tiempo polinomial determinista, el test de Miller fue reemplazado por la prueba de primalidad de Agrawal–Kayal–Saxena (AKS), que no se basa en suposiciones no probadas.

Parte II

GRAFOS

GRAFOS

5.1 GRAFOS Y SUS REPRESENTACIONES

Los objetos a los cuales llamaremos *grafos* son muy útiles en matemática discreta. Su nombre se deriva del hecho de que pueden ser entendidos con una notación gráfica (o pictórica), y en este aspecto solamente se parecen a los familiares gráficos de funciones que son estudiados en matemática elemental. Pero nuestros grafos son bastante diferentes de los gráficos de funciones y están más relacionados con objetos que en el lenguaje diario llamamos *redes* (networks).

Usaremos la siguiente definición en lo que sigue: dado un conjunto X un *2-subconjunto* es un subconjunto de X de dos elementos.

Definición 5.1.1. Un *grafo* G consiste de un conjunto finito V , cuyos miembros son llamados *vértices*, y un conjunto de 2-subconjuntos de V , cuyos miembros son llamados *aristas*. Nosotros usualmente escribiremos $G = (V, E)$ y diremos que V es el *conjunto de vértices* y E es el *conjunto de aristas*.

La restricción a un conjunto finito no es esencial, pero es conveniente para nosotros debido a que no consideraremos “grafos infinitos” en este apunte.

Un ejemplo típico de un grafo $G = (V, E)$ es dado por los conjuntos

$$V = \{a, b, c, d, z\}, \quad E = \{\{a, b\}, \{a, d\}, \{b, z\}, \{c, d\}, \{d, z\}\}. \quad (5.1.1)$$

Este ejemplo y la definición misma no son demasiado esclarecedores, y solamente cuando consideramos la *representación pictórica* de un grafo es cuando se hace la luz.

Nosotros representamos los vértices como puntos, y unimos dos puntos con una línea siempre y cuando el correspondiente par de vértices está en una arista. Luego la Fig. 4 es una representación pictórica del grafo dado en el ejemplo arriba. Esta clase de representación es extremadamente conveniente para trabajar “a mano” con grafos relativamente pequeños. Más aún, esta representación es de gran ayuda para formular y comprender argumentos abstractos. Nosotros damos a continuación un ejemplo frívolo.

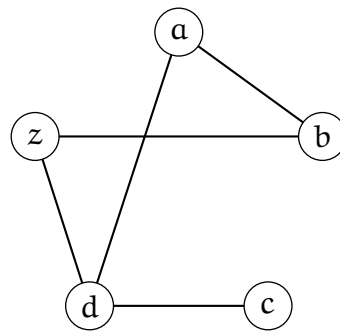


Figura 4: Una representación pictórica del grafo definido en (5.1.1).

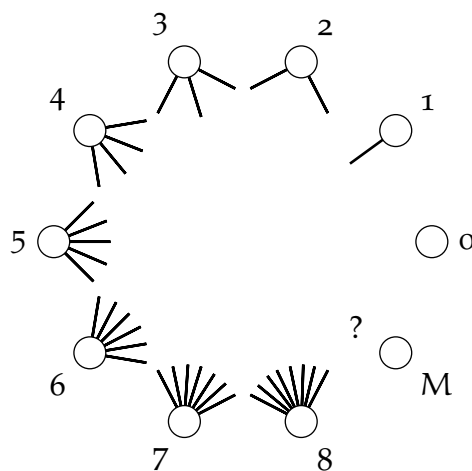


Figura 5: La fiesta de Abril

Ejemplo. Mario y su mujer Abril dan una fiesta en la cual hay otras cuatro parejas de casados. Las parejas, cuando arriban, estrechan la mano a algunas personas, pero, naturalmente, no se estrechan la mano entre marido y mujer. Cuando la fiesta finaliza el profesor pregunta a los otros a cuántas personas han estrechado la mano, recibiendo 9 respuestas diferentes. ¿Cuántas personas estrecharon la mano de Abril?

Solución. Construyamos un grafo cuyos vértices son las personas que asisten a la fiesta. Las aristas del grafo son las $\{x, y\}$ siempre y cuando x e y se hayan estrechado las manos. Puesto que hay nueve personas aparte de Mario, y que una persona puede estrechar a lo sumo a otras 8 personas, se sigue que las 9 respuestas diferentes que ha recibido el profesor deben ser 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8. Denotemos los vértices con estos números y usemos M para Mario. Así obtenemos la representación pictórica de la Fig. 5

Ahora, el vértice 8 alcanza a todos los otros vértices excepto uno, el cual debe por lo tanto representar a la esposa de 8. Este vértice debe ser el 0 el cual por cierto que no está unido al 8 (ni obviamente a ningún otro). Luego

8 y 0 son una pareja de casados y 8 está unido a 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y M. En particular el 1 está unido al 8 y ésta es la única arista que parte del 1. Por consiguiente 7 no está unido al 0 y al 1 (únicamente), y la esposa de 7 debe ser 1, puesto que 0 está casado con 8. Continuando con este razonamiento vemos que 6 y 2, y 5 y 3 son parejas de casados. Se sigue entonces que M y 4 están casados, luego el vértice 4 representa a Abril, quien estrechó la mano de cuatro personas. \square

Aunque la representación pictórica es intuitivamente atractiva para los seres humanos, es claramente inútil cuando deseamos comunicarnos con una computadora. Para lograr esto debemos representar el grafo mediante cierta clase de lista o tabla. Diremos que dos vértices x e y de un grafo son *adyacentes* cuando $\{x, y\}$ es una arista. (o también diremos que x e y son *vecinos*). Entonces podemos representar un grafo $G = (V, E)$ por su *lista de adyacencia*, donde cada vértice v encabeza una lista de aquellos vértices que son adyacentes a v . El grafo de Fig. 4 tiene la siguiente lista de adyacencia:

a	b	c	d	z
b	a	d	a	b
d	z		c	d
			z	

Las listas de adyacencia son redundantes (cada arista está representada dos veces) pero como todo lenguaje de programación de alto nivel maneja la estructura tipo lista, preferimos esta representación pues un grafo resulta ser una lista de listas o un arreglo de listas.

Ejemplo. Por cada entero positivo n definimos el *grafo completo* K_n como el grafo con n vértices y en el cual cada par de vértices es adyacente.

¿Cuántas aristas tiene K_n ? De cada vértice “salen” $n - 1$ aristas, las que van a otros vértices. Si sumamos n -veces las $n - 1$ aristas es claro que estamos contando cada arista dos veces, luego el número total de aristas es $n(n - 1)/2$ (observar que esta es una demostración, usando grafos, de que $\sum_{i=1}^n i = n(n + 1)/2$).

§ Ejercicios

- 1) A tres casas A, B, C se les debe conectar el gas, el agua y la electricidad: G, W, E. Escribir la lista de adyacencia para el grafo que representa este problema y construir una representación pictórica del mismo. ¿Puede usted encontrar un dibujo en el cual las líneas que representan las aristas no se crucen?

- 2) Los senderos de un jardín han sido diseñados dándoles forma de *grafo rueda* W_n , cuyos vértices son $V = \{0, 1, 2, \dots, n\}$ y sus aristas son

$$\begin{aligned} &\{0, 1\}, \quad \{0, 2\}, \dots, \{0, n\}, \\ &\{1, 2\}, \quad \{2, 3\}, \dots, \{n-1, n\}, \quad \{n, 1\}. \end{aligned}$$

Describir una ruta por los senderos de tal forma que empiece y termine en el vértice 0 y que pase por cada vértice una sola vez.

- 3) ¿Para cuales valores de n se puede hacer una representación pictórica de K_n con la propiedad que las líneas que representan las aristas no se corten?
- 4) Un *3-ciclo* en un grafo es un conjunto de tres vértices mutuamente adyacentes. Construir un grafo con cinco vértices y seis aristas que no contenga 3-ciclos.

5.2 ISOMORFISMO DE GRAFOS

En este punto nosotros debemos enfatizar que un grafo está definido como una entidad matemática abstracta. Es en este contexto que nosotros discutiremos el importante problema de que queremos decir cuando decimos que dos grafos son “el mismo”.

Claramente lo importante de un grafo no son los nombres con que designamos a los vértices, ni su representación pictórica o cualquier otra representación. La propiedad característica de un grafo es la manera en que los vértices están conectados por aristas.

Antes de definir isomorfismo de grafos repasaremos el concepto de función o aplicación biyectiva. Dado dos conjuntos X, Y diremos que una aplicación $f : X \rightarrow Y$ es *biyectiva* si para cada $y \in Y$ existe un único $x \in X$ tal que $f(x) = y$. Una propiedad importante, de las funciones biyectivas es que f es biyectiva si y sólo si f tiene *inversa*, es decir existe $f^{-1} : Y \rightarrow X$, tal que $f(f^{-1}(y)) = y, \forall y \in Y$ y $f^{-1}(f(x)) = x, \forall x \in X$.

Ejemplo. La función

$$f : \{1, 2, 3\} \rightarrow \{a, b, c\} \quad \text{definida } f(1) = c, f(2) = b, f(3) = a$$

es biyectiva y su inversa es

$$f^{-1}(a) = 3, f^{-1}(b) = 2, f^{-1}(c) = 1.$$

También es biyectiva la aplicación

$$g : \{x, y\} \times \{u, w, z\} \rightarrow \{1, 2, 3, 4, 5, 6\} \quad \text{definida}$$

$$g(x, u) = 1, g(x, w) = 2, g(x, z) = 3, g(y, u) = 4, g(y, w) = 5, g(y, z) = 6.$$

Definición 5.2.1. Dos grafos G_1 y G_2 se dicen que son *isomorfos* cuando existe una biyección α entre el conjunto de vértices de G_1 y el conjunto de vértices de G_2 tal que si $\{x, y\}$ es una arista de G_1 entonces $\{\alpha(x), \alpha(y)\}$ es una arista de G_2 y recíprocamente si $\{z, w\}$ es una arista de G_2 entonces $\{\alpha^{-1}(z), \alpha^{-1}(w)\}$ es una arista de G_1 . La biyección α es llamada un *isomorfismo*.

Por ejemplo, considere los dos grafos de la Fig. 6. En este caso hay una biyección entre el conjunto de vértices de G_1 y el conjunto de vértices de G_2 la cual tiene la propiedad requerida; esta biyección es dada por

$$\alpha(a) = t, \quad \alpha(b) = v, \quad \alpha(c) = w, \quad \alpha(d) = u.$$

Podemos comprobar que a cada arista de G_1 le corresponde una arista de G_2 y viceversa. Por ejemplo, a la arista bc de G_1 le corresponde la arista vw de G_2 , y así siguiendo. (Usaremos la abreviación xy para la arista $\{x, y\}$, recordando que una arista es un par desordenado, es decir xy es lo mismo que yx .)

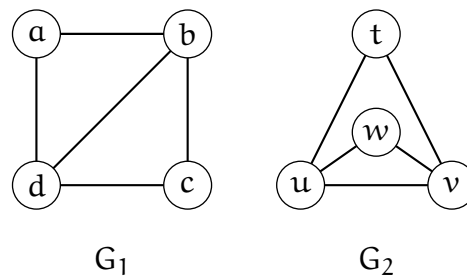


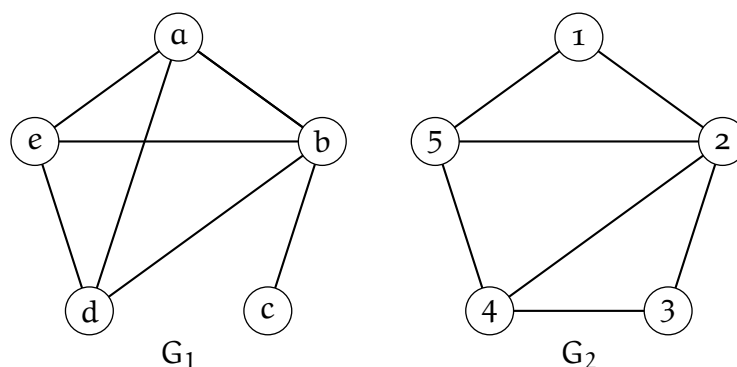
Figura 6: G_1 y G_2 son isomorfos

Cuando, como en la Fig. 6, dos grafos G_1 y G_2 son isomorfos usualmente nos referiremos a ellos como que son “el mismo” grafo.

Para mostrar que dos grafos no son isomorfos, nosotros debemos demostrar que no hay una biyección entre el conjunto de vértices de uno con el conjunto de vértices de otro, que lleve las aristas de uno en las aristas del otro.

Si dos grafos tienen diferente número de vértices, entonces no es posible ninguna biyección, y los grafos no pueden ser isomorfos. Si los grafos tienen el mismo número de vértices, pero diferente número de aristas, entonces hay biyecciones de vértices pero ninguna de ellas puede ser un isomorfismo.

Definición 5.2.2. Sea $G = (V, E)$ un grafo. Se dice que $G' = (V', E')$ es *subgrafo* de $G = (V, E)$ si $V' \subset V$, $E' \subset E$ y todos los vértices que son extremos de las aristas de E' están en V' .

Figura 7: G_1 y G_2 no son isomorfos

Es claro, pero no lo demostraremos aquí, que un isomorfismo lleva un subgrafo a un subgrafo isomorfo. Este resultado es una herramienta que puede ser útil para ver si dos grafos no son isomorfos.

Por ejemplo, los dos grafos de la Fig. 7 tienen cada uno cinco vértices y siete aristas pero no son isomorfos. Una manera de ver esto es observar que los vértices a, b, d, e forman un subgrafo completo de G_1 (cada par de ellos está conectado por una arista). Cualquier isomorfismo debe llevar estos vértices en cuatro vértices de G_2 con la misma propiedad, y puesto que no hay tal conjunto de vértices en G_2 no puede haber ningún isomorfismo.

§ Ejercicios

- 1) Probar que los grafos mostrados en la Fig. 8 no son isomorfos.

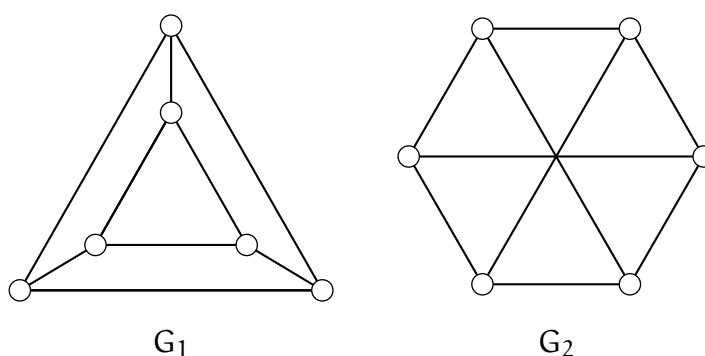


Figura 8: Probar que estos grafos no son isomorfos

- 2) Encontrar un isomorfismo entre los grafos definidos por las siguientes listas de adyacencias. (Ambas listas especifican versiones de un grafo famoso conocido como *grafo de Petersen*).

a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b	a	b	c	d	a	b	c	d	e	1	2	3	4	5	0	1	0	2	6
e	c	d	e	a	h	i	j	f	g	5	0	1	2	3	4	4	3	5	7
f	g	h	i	j	i	j	f	g	h	7	6	8	7	6	8	9	9	9	8

- 3) Sea $G = (V, E)$ el grafo definido como sigue: el conjunto de vértices V es el conjunto de todas las palabras de longitud tres en el alfabeto $\{0, 1\}$, y el conjunto de aristas E contiene aquellos pares de palabras que difieren exactamente en una posición. Probar que G es isomorfo al grafo formado por las esquinas y aristas de un cubo.

5.3 VALENCIAS DE UN GRAFO

La *valencia* o *grado* de un vértice v en un grafo $G = (V, E)$ es el número de aristas de G que contienen a v . Usaremos la notación $\delta(v)$ para la valencia de v , formalmente

$$\delta(v) = |D_v|, \quad \text{donde} \quad D_v = \{e \in E | v \in e\}.$$

El grafo descrito en Fig. 4 tiene $\delta(a) = 2$, $\delta(b) = 2$, $\delta(c) = 1$, $\delta(d) = 3$, $\delta(z) = 2$. El primer teorema de la teoría de grafos nos dice que la suma de estos números es dos veces el número de aristas.

Teorema 5.3.1. *La suma de los valores de las valencias $\delta(v)$, tomados sobre todos los vértices v del grafo $G = (V, E)$, es igual a dos veces el número de aristas:*

$$\sum_{v \in V} \delta(v) = 2|E|.$$

Demostración. La valencia de un vértice v indica la cantidad de “extremos” de aristas que “tocan” a v . Es claro que hay $2|E|$ extremos de aristas, luego la suma total de las valencias de los vértices es $2|E|$. \square

Hay un útil corolario de este resultado. Diremos que un vértice de G es *impar* si su valencia es impar, y *par* si su valencia es par. Denotemos V_i y V_p los conjuntos de vértices impares y pares respectivamente, luego $V = V_i \cup V_p$ es una partición de V . Por teorema 5.3.1, tenemos que

$$\sum_{v \in V_i} \delta(v) + \sum_{v \in V_p} \delta(v) = 2|E|.$$

Ahora cada término en la segunda suma es par, luego esta suma es un número par. Puesto que el lado derecho también es un número par, la primera suma debe ser también par. Pero la suma de números impares solo puede ser par si el número de términos es par. En otras palabras:

Teorema 5.3.2. *El número de vértices impares es par.*

Este resultado es a veces llamado el “handshaking lemma” (handshak = estrechar la mano, darse la mano), debido a que se puede interpretar en términos de gente y darse la mano: dado un conjunto de personas, el número de personas que le ha dado la mano a un número impar de miembros del conjunto es par.

Un grafo en el cual todos los vértices tienen la misma valencia r se llama *regular* (con valencia r), o *r -valente*, o de *grado* r . En este caso, el resultado del teorema 5.3.1 se traduce a

$$r|V| = 2|E|.$$

Muchos de los grafos que aparecen en las aplicaciones son regulares. Ya conocemos los grafos completos K_n ; ellos son regulares, con valencia $n - 1$. De geometría elemental conocemos los polígonos de n lados, los cuales en teoría de grafos son llamados *grafos cíclicos* C_n . Formalmente, podemos decir que el conjunto de vértices de C_n es \mathbb{Z}_n , y los vértices i y j están unidos si $j = i + 1$ o $j = i - 1$ en \mathbb{Z}_n . Claramente, C_n es un grafo regular con valencia 2, si $n \geq 3$.

Una aplicación importante de la noción de valencia es en el problema de determinar si dos grafos son o no isomorfos. Si $\alpha : V_1 \rightarrow V_2$ es un isomorfismo entre G_1 y G_2 , y $\alpha(v) = w$, entonces cada arista que contiene a v se transforma en una arista que contiene a w . En consecuencia $\delta(v) = \delta(w)$. Por otro lado, si G_1 tiene un vértice x , con valencia $\delta(x) = \delta_0$, y G_2 no tiene vértices con valencia δ_0 , entonces G_1 y G_2 no pueden ser isomorfos. Esto nos da otra manera para distinguir los grafos de la Fig 7, puesto que el primer grafo tiene un vértice de valencia 1 y el segundo no.

Una extensión de esta idea se da en la siguiente proposición.

Proposición 5.3.3. *Sean G_1 y G_2 grafos isomorfos. Para cada $k \geq 0$ sea $n_i(k)$ el número de vértices de G_i que tienen valencia k ($i = 1, 2$). Entonces $n_1(k) = n_2(k)$.*

Demostración. Hemos visto más arriba que si $\alpha : V_1 \rightarrow V_2$ es un isomorfismo entre G_1 y G_2 y $v \in V_1$, entonces $\delta(v) = \delta(\alpha(v))$. Luego la cantidad de vértices con valencia k en G_1 es igual a la cantidad de vértices con valencia k en G_2 . \square

Ejemplo. Revisemos los grafos de la Fig. 7 y la Fig. 8 de la sección anterior.

Los dos grafos de la Fig. 7 no son isomorfos debido a que en el primer grafo existen tres vértices con valencia 3 mientras que en el segundo existen sólo dos.

Observar que los criterios vistos hasta ahora relativos a cantidad de vértices, cantidad de aristas y valencias, incluyendo el de la proposición 5.3.3, no son útiles para determinar si los grafos de la Fig. 8 son isomorfos o no: ambos tienen 6 vértices, 9 aristas y todos los vértices son de valencia 3. Sin embargo, en el caso de la Fig. 8 podemos determinar que los grafos no son isomorfos observando los subgrafos de cada uno. Ahora bien, no hay ningún criterio general eficiente para determinar si dos grafos son isomorfos o no: en los casos difíciles esencialmente debemos probar con todas las biyecciones posibles de los vértices de un grafo a los vértices del otro y eso es no computable para casos no demasiado grandes.

§ Ejercicios

- 1) ¿Es posible que las siguientes listas sean las valencias de todos los vértices de un grafo? Si así lo fuera, dar una representación pictórica de tal grafo. (Recordar que hay a lo más una arista que una un par de vértices dados.)

a) 2, 2, 2, 3.	b) 1, 2, 2, 3, 4.
c) 2, 2, 4, 4, 4.	d) 1, 2, 3, 4.
- 2) Si $G = (V, E)$ es un grafo, el *complemento* G^c de G es el grafo cuyo conjunto de vértices es V y cuyas aristas unen aquellos vértices que no son unidos por G . Si G tiene n vértices y sus valencias son d_1, d_2, \dots, d_n , ¿cuáles son las valencias de G^c ?
- 3) Encontrar todos los grafos posibles (no isomorfos) que pueda, que sean regulares, 4-valentes y con 7 vértices. [Ayuda: considere el complemento de esos grafos.]
- 4) Probar que si G es un grafo con al menos dos vértices, entonces G tiene dos vértices con la misma valencia.

5.4 CAMINOS Y CICLOS

Frecuentemente usamos grafos como modelos de situaciones prácticas que involucran rutas: los vértices representan ciudades o cruces, y cada arista representa una ruta o cualquier otra forma de comunicación. Las

definiciones de esta sección se comprenderán mejor con esta clase de ejemplo en mente.

Definición 5.4.1. Una *caminata* en un grafo G es una secuencia de vértices

$$v_1, v_2, \dots, v_k,$$

tal que v_i y v_{i+1} son adyacentes ($1 \leq i \leq k-1$). Si todos los vértices son distintos, una caminata es llamada un *camino*.

Llamaremos *ciclo* a una caminata v_1, v_2, \dots, v_{r+1} con $r \geq 3$ y cuyos vértices son distintos exceptuando los extremos, es decir que v_1, v_2, \dots, v_r es un camino de al menos tres vértices y $v_1 = v_{r+1}$. A menudo diremos que es un *r-ciclo*, o un ciclo de *longitud* r en G .

Es decir, una caminata especifica una ruta en G : del primer vértice vamos a uno adyacente, de éste a otro adyacente y así siguiendo. En una caminata podemos visitar cualquier vértice varias veces, y en particular, podemos ir de un vértice x a otro y y luego tomar la dirección contraria y regresar a x . En un camino, cada vértice es visitado solo una vez.

Escribamos $x \sim y$ siempre y cuando los vértices x e y de G puedan ser unidos por un camino en G : hablando en forma rigurosa, esto significa que hay un camino v_1, v_2, \dots, v_k en G con $x = v_1$ e $y = v_k$.

Lema 5.4.2. Sea G un grafo. $x \sim y$ si y sólo si x e y pueden ser unidos por una caminata

Demostración. Es claro que si x e y están unidos por un camino, como un camino es un caso especial de caminata, x e y están unidos por una caminata.

Veamos que si x e y están unidos por una caminata, entonces están unidos por un camino. Sea

$$x = x_1, x_2, \dots, x_k = y,$$

una caminata entre x e y . Si ninguno de los x_i se repite, entonces tenemos un camino y terminado el problema. Si hay repetición, entonces existe j tal que $x_j = x_{j+r}$ con $r > 0$, es decir tenemos una caminata

$$x = x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_{j+r}, \dots, x_k = y,$$

Como $x_j = x_{j+r}$ podemos eliminar la subcaminata x_{j+1}, \dots, x_{j+r} (un “bucle” dentro de la caminata) y nos queda

$$x = x_1, x_2, \dots, x_j, x_{j+r+1}, \dots, x_k = y,$$

una caminata, más corta, entre x e y . Podemos repetir este procedimiento hasta eliminar todos los “bucles” y obtener un camino. \square

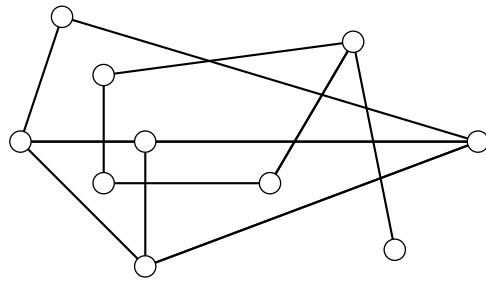


Figura 9: Un grafo con dos componentes

Definición 5.4.3. Diremos que un grafo G es *conexo* si para cualesquiera dos vértices x, y existe una camina de x a y , es decir si $x \sim y$.

Debido al lema que probamos más arriba, es sencillo verificar las siguientes propiedades: sea G grafo y sean x, y, z vértices de G , entonces

- a) $x \sim x$ (reflexividad de \sim).
- b) $x \sim y$, entonces $y \sim x$ (simetría de \sim).
- c) $x \sim y$, $y \sim z$, entonces $x \sim z$ (transitividad de \sim).

En un lenguaje formal, una relación que cumple las tres propiedades anteriores es llamada una *relación de equivalencia* del conjunto, en este caso tenemos una relación de equivalencia del conjunto de vértices V de G . Como ya vimos en el capítulo 4, página 72, la congruencia módulo es también una relación de equivalencia, y hay muchísimos ejemplos en matemática de estos tipos de relaciones.

Estas tres propiedades que posee la relación de equivalencia permiten partir a V en conjuntos disjuntos: dos vértices están en el mismo conjunto si ellos pueden ser unidos por un camino, y están en conjuntos diferentes si no podemos encontrar tal camino. llamaremos a estos conjuntos disjuntos las *clases de equivalencia* de \sim .

Definición 5.4.4. Supongamos que $G = (V, E)$ es un grafo y que la partición de V en las clases de equivalencia de \sim es

$$V = V_1 \cup V_2 \cup \cdots \cup V_r.$$

Denotemos con E_i ($1 \leq i \leq r$) al subconjunto de E que contiene todas las aristas cuyos finales están en V_i . Entonces los grafos $G_i = (V_i, E_i)$ son llamados las *componentes* de G . Si G tiene solo una componente entonces, claramente, el grafo es conexo.

La terminología casi explica por si misma el significado de estas definiciones. El grafo mostrado en la Fig. 9 tiene dos componentes, y por

consiguiente no es conexo. La descomposición de un grafo en componentes es muy útil, puesto que muchas propiedades de los grafos pueden ser establecidas considerando las componentes separadamente. Por esta razón, teoremas acerca de grafos a menudo son probados solo para la clase de grafos conexos.

Cuando un grafo de moderado tamaño es dado por una representación pictórica es bastante fácil determinar si es o no conexo. Sin embargo, cuando un grafo es dado por una lista de adyacencia necesitaremos un algoritmo eficiente para decidir si es o no conexo.

Ejemplo 5.4.5. Leandro y Juan, dos amigos, planean tomar sus vacaciones en determinada isla. La Fig. 10 representa los lugares de interés turístico de la isla y las carreteras que los unen. Leandro es un turista por naturaleza, y desea visitar cada lugar una vez y volver al punto de partida. Juan es un explorador, y desea atravesar todos los caminos solo una vez, a él lo tiene sin cuidado si regresa o no al lugar del cual partió. ¿Podrán encontrar las rutas que desean Leandro y Juan?

Solución. Leandro puede usar diferentes rutas para alcanzar su objetivo: una posibilidad es el ciclo p, q, t, s, u, r, p .

Sin embargo, Juan está en un apuro. Llamemos x al punto de partida y llamemos y al punto de llegada, y supongamos por el momento que $x \neq y$. Entonces él usa una arista con extremo en x para partir y cada vez que vuelve a x debe arribar y partir por nuevas aristas. Luego, usa un número impar de aristas con extremo en x , y por consiguiente x debe ser un vértice impar. De manera análoga, y debe ser también un vértice impar, puesto que Juan usa dos aristas cada vez que pasa por y , y una más al finalizar en y . Los restantes vértices deben ser pares, puesto que cada vez que Juan llega a un vértice intermedio parte de nuevo, y por consiguiente usa dos aristas.

Resumiendo, una ruta para Juan que empiece y finalice en vértices distintos x e y , es solo posible si hay dos vértices impares (que son x e y) y

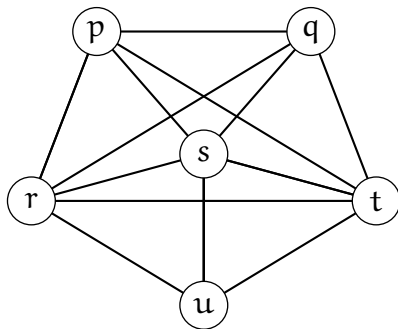


Figura 10: El gran tour

el resto de los vértices es par. Pero en el grafo de la Fig. 10 el valor de las valencias es: $\delta(p) = 4$, $\delta(q) = 4$, $\delta(r) = 5$, $\delta(s) = 5$, $\delta(t) = 5$, y $\delta(u) = 3$. Luego hay demasiados vértices impares, y por lo tanto no existe la ruta que Juan desea. Si permitimos la posibilidad de que $x = y$, la situación es aún peor, pues en este caso todos los vértices deberían ser pares. \square

En general, la ruta de Leandro es un ciclo que contiene todos los vértices del grafo dado. Tales ciclos fueron estudiados por el matemático irlandés W.R. Hamilton (1805 – 65), y en consecuencia un ciclo con esta propiedad es llamado un *ciclo hamiltoniano*. En nuestro ejemplo, fue muy fácil encontrar un ciclo hamiltoniano, pero este fue un caso muy especial y no representativo. Para ciertos grafos, puede ser un problema difícil decidir si un ciclo hamiltoniano existe o no.

Por otro lado, el problema de Juan puede ser fácilmente resuelto. Una caminata que use cada arista de un grafo solo una vez es llamada una *caminata euleriana*, debido a que Euler fue el primero en estudiar estas caminatas y encontró que si $x \neq y$, una condición necesaria para que exista una caminata euleriana que comience en x y finalice en y es que x e y deben ser vértices impares y el resto debe ser par, mientras que si $x = y$ la condición es que todos los vértices deben ser pares. Es decir que una condición necesaria para que exista una caminata euleriana en un grafo G es que G debe tener a lo más dos vértices impares. Más aún, puede probarse que esta condición es también suficiente. Puesto que es sencillo calcular las valencias de los vértices de un grafo, es relativamente sencillo decidir si un grafo tendrá o no una caminata euleriana.

Resumiendo las definiciones de más arriba:

Definición 5.4.6. Un *ciclo hamiltoniano* en un grafo G es un ciclo que contiene a todos los vértices del grafo.

Una *caminata euleriana* en un grafo G es una caminata que usa todas las aristas de G exactamente una vez. Una caminata euleriana que comienza y termina en un mismo vértice se llama también *circuito euleriano*.

El siguiente teorema resume los resultados sobre caminatas eulerianas. La demostración no es demasiado complicada, pero la veremos más adelante.

Teorema 5.4.7. Un grafo conexo con más de un vértice posee una caminata euleriana de v a w , con $v \neq w$ si y sólo si v y w son los únicos vértices de grado impar. Un grafo conexo con más de un vértice tiene un circuito euleriano si y sólo si todos los vértices tienen grado par.

Observación 5.4.8. El caso de un grafo donde todas las valencias son pares se puede reducir al anterior: si deseamos una caminata euleriana que empiece

y termine en v , eliminamos una arista del grafo que contenga a v , digamos la arista $\{v, w\}$ (con lo cual queda un grafo con solo dos vértices, v y w , de valencia impar), aplicamos el caso anterior, con lo cual hacemos una caminata euleriana que termina en w , y terminamos la caminata agregando la arista $\{v, w\}$.

Observación 5.4.9. Recíprocamente, el caso de un grafo G con dos valencias impares y todas las demás valencias pares se puede reducir al caso en que todas las valencias son pares. Sean p y q los dos vértices de valencia impar, entonces tenemos dos casos (1) $\{p, q\}$ es arista de G y (2) $\{p, q\}$ no es arista de G . En el caso (1), eliminamos la arista $\{p, q\}$ del grafo y nos queda un grafo con todos los vértices de valencia par. Por lo tanto, hay un circuito euleriano de p a p . Agregamos al final la arista $\{p, q\}$ y obtenemos una caminata euleriana de p a q . El caso (2) es un poco más complicado: agregamos al grafo G la arista $\{p, q\}$ y obtenemos un grafo con todos los vértices de valencia par. Luego hay un circuito euleriano de q a q . Podemos describir el circuito como

$$q, v_1, \dots, v_k, q, p, w_1, \dots, w_r, q.$$

A partir de este circuito podemos obtener la caminata

$$p, w_1, \dots, w_r, q, v_1, \dots, v_k, q,$$

que es una caminata euleriana.

Algoritmo de Hierholzer

C. Hierholzer (1840-1871) mostró, poco antes de su muerte, un algoritmo fácilmente implementable para encontrar un circuito euleriano para cualquier grafo con vértices de grado par. El algoritmo de Hierholzer fue la primera demostración del teorema 5.4.7 para el caso de grafos con vértices de grado par. Obviamente, debido a la observación 5.4.9, esto demuestra también el teorema para grafos con dos valencias impares.

La idea clave del algoritmo de Hierholzer es la siguiente: en un grafo de valencias pares (conexo o no conexo) cada vez que inicio una caminata que no repite aristas puedo volver al vértice original. Observar que no es posible quedarse atascado en ningún vértice que no sea el vértice original, porque el grado par de todos los vértices garantiza que, cuando se ingresa a un vértice distinto al original debe haber una arista sin usar que nos permite dejarlo.

El algoritmo es el siguiente:

- (1) **Paso 1.** Elija cualquier vértice inicial v y haga una caminata que no repita aristas y que vuelva al vértice (de v a v).

El recorrido formado de esta manera es un recorrido cerrado, pero puede no cubrir todos los vértices y aristas del grafo inicial.

- (2) **Paso iterativo** Mientras exista un vértice u en la caminata ya realizada, pero que tenga aristas que no formen parte de la caminata, inicie otra caminata desde u hasta u siguiendo las aristas no utilizadas. Luego, inserte esta caminata a la caminata anterior para formar una caminata nueva (más larga).

Observemos que el subgrafo formado por todas las aristas utilizadas después de cada paso iterativo es un grafo con valencias pares y por lo tanto el subgrafo que obtenemos luego de quitar estas aristas también es par. Esto nos permite hacer caminatas cerradas por aristas no utilizadas desde cada vértice con aristas no utilizadas.

Puesto que suponemos que el grafo original es conexo, repetir el paso iterativo agotará todas las aristas del grafo.

Ejemplo. Dado el grafo de la Fig. 11, encontremos una caminata euleriana con origen en p y final en r .

Debemos primero observar que debe existir un circuito euleriano, pues $\delta(p) = 4$, $\delta(q) = 4$, $\delta(r) = 4$, $\delta(s) = 4$, $\delta(t) = 4$, y $\delta(u) = 2$, es decir todos los vértices tienen grado par.

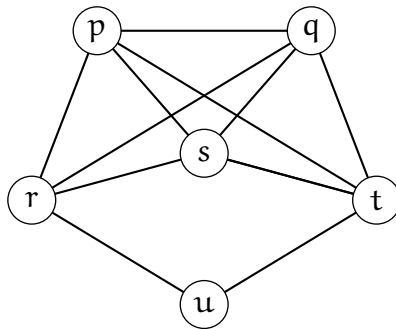


Figura 11: El gran tour, de nuevo.

Apliquemos el algoritmo de Hierholzer partiendo desde p . Una caminata posible con origen en p y que vuelva a p es

$$p, q, s, r, p.$$

Ahora elijamos q que es un vértice que pertenece a la caminata pero que tiene aristas que no son parte de la caminata. Una caminata que no toca aristas usadas y que parte de q y regresa a q es q, r, u, t, q . Insertamos en q esta caminata a la caminata anterior y obtenemos:

$$p, q, r, u, t, q, s, r, p.$$

(En **negrita** la caminata insertada).

En el siguiente paso podemos elegir t y hacer la caminata t, p, s, t que no pasa por aristas ya utilizadas. Insertamos esta caminata en algún t de la caminata anterior y obtenemos:

$$p, q, r, u, t, p, s, t, q, s, r, p,$$

que es un circuito euleriano.

Observación. Escribiremos en pseudocódigo el algoritmo para hallar un circuito euleriano en un grafo G con n vértices de valencia par.

Tenemos una grafo G con n vértices numerados $0, 1, \dots, n-1$, G se representa por una lista de adyacencia, es decir $G[i]$ es la lista de vértices adyacentes a i . Tomamos como comienzo del recorrido el vértice arbitrario 0 .

Como ya mencionamos anteriormente, a un grafo G lo representaremos por una lista de adyacencia. Supongamos que los vértices de G son $0, \dots, k$, entonces $G[i] = [i_0, i_1, \dots]$ serán los vértices adyacentes al vértice i .

CAMINATA EULERIANA

```
# pre: G grafo con todos los vértices de valencia par
# post: devuelve 'circuito' una lista de vértices que forma una
#       caminata euleriana.
#       La caminata empieza en 0 (y terminará en 0).
circuito = [0] # inicio de la caminata
libres = copiar_grafo(G) # aristas no utilizadas
while nro_aristas(libres) > 0:
    sub_cam = []
    h = 0
    while libres[h] == [] or h not in circuito:
        h = h + 1
    # h = vértice en circuito y libre[h] != [] (hay aristas libres)
    pos = circuito.index(h) # posición de la 1ª ocurrencia de h
    p0 = h
    p1 = libres[h][0]
    while p1 != h: # mientras no se vuelva al origen
        sub_cam.append(p1) # agrega p1 a sub_cam
        libres.remove({p0, p1}) # quitar arista p0, p1
        p0 = p1
        p1 = libres[p0][0]
    libres.remove({p0, h}) # quitar arista p0, h
    circuito = circuito[:pos+1] + sub_cam + circuito[pos:]
return circuito
```

En todo el programa `libres` es una lista de adyacencia que nos va dando las aristas no utilizadas. Es decir si w es un vértice `libres[w]` es una lista de los vértices u tal que la arista wu no ha sido utilizada.

§ Ejercicios

- 1) Encontrar el número de componentes de el grafo cuya lista de adyacencia es

a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
f	c	b	h	c	a	b	d	a	a
i	g	e		g	i	c		f	f
j		g			j	e			

- 2) ¿Cuántas componentes conexas tiene el grafo de la fiesta de Abril (sección 5.1)?
- 3) Encontrar un ciclo hamiltoniano en el grafo formado por los vértices y aristas de un cubo.
- 4) El año que viene el Leandro y Juan desean visitar otra isla, donde los lugares interesantes y las caminos que los unen están representados por el grafo que tiene la siguiente lista de adyacencia

0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	1	0	3	0	1	0	1
3	2	3	2	5	4	5	2	3
5	6	7	4		6	7	6	5
7	8		8		8		8	7.

¿Es posible encontrar rutas para Leandro y Juan que satisfagan lo pedido en el ejemplo 5.4.5?

- 5) Un ratón intenta comer un $3 \cdot 3 \cdot 3$ cubo de queso. Él comienza en una esquina y come un subcubo de $1 \cdot 1 \cdot 1$, para luego pasar a un subcubo adyacente. ¿Podrá el ratón terminar de comer el queso en el centro?

5.5 ÁRBOLES

Definición 5.5.1. Diremos que un grafo T es un *árbol* si cumple

T1) T es conexo y no hay ciclos en T .

Algunos árboles típicos han sido dibujados en la Fig. 12. A causa de su particular estructura y propiedades, los árboles aparecen en diversas

aplicaciones de la matemática, especialmente en investigación operativa y ciencias de la computación. Comenzaremos el estudio de ellos estableciendo algunas propiedades sencillas.

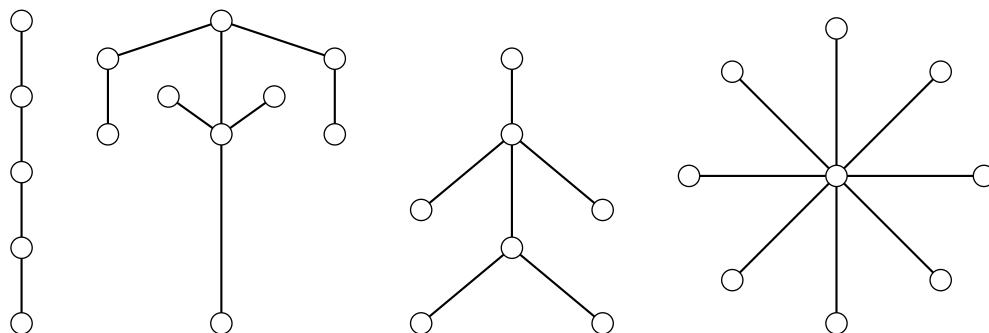


Figura 12: Algunos árboles

El siguiente lema nos resultará útil para probar una parte del teorema fundamental de esta sección.

Lema 5.5.2. Sea $G = (V, E)$ un grafo conexo, entonces $|E| \geq |V| - 1$.

Demostración. Como G es conexo existe una caminata que recorre todos los vértices de G :

$$v_1, v_2, \dots, v_r.$$

Renombremos los vértices de G con números naturales de tal forma que el primer vértice de la caminata sea 1, el segundo 2 y cada vez que aparece un vértice que no ha sido renombrado se le asigna el número siguiente. Luego la caminata comienza en 1 y termina en n , donde $n = |V|$. Observar que cada vez que renombramos un vértice (excepto el primero) su antecesor es menor, es decir dado i tal que $1 < i \leq n$ tenemos que la caminata tiene la forma

$$1, \dots, j_i, i, \dots, j_n, n$$

donde $j_i < i$, luego es claro que

$$\{j_2, 2\}, \{j_3, 3\}, \dots, \{j_n, n\}$$

forman un conjunto de $n - 1$ aristas distintas en G . □

Teorema 5.5.3. Si $T = (V, E)$ es un grafo conexo con al menos dos vértices, entonces son equivalentes las siguientes propiedades

T1) T es un árbol.

T2) Para cada par x, y de vértices existe un único camino en T de x a y .

T3) El grafo obtenido de T removiendo alguna arista tiene dos componentes, cada una de las cuales es un árbol.

T4) $|E| = |V| - 1$.

Demostración.

($T_1 \Rightarrow T_2$) Puesto que T es conexo, existe un camino de x a y , digamos

$$x = v_0, v_1, \dots, v_r = y.$$

Si existiera otro camino, digamos

$$x = u_0, u_1, \dots, u_s = y,$$

consideremos i el más pequeño subíndice para el cual se cumple que $u_{i+1} \neq v_{i+1}$ Fig. 13.

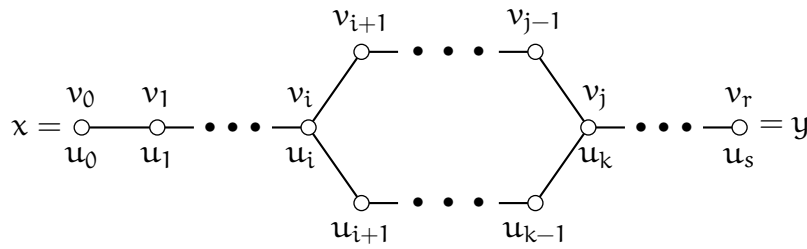


Figura 13: Dos caminos diferentes determinan un ciclo

Puesto que ambos caminos finalizan en y ellos se encontrarán de nuevo, y entonces podemos definir j como el más pequeño subíndice tal que

$$j > i \quad y \quad v_j = u_k \quad \text{para algún } k.$$

Entonces $v_i, v_{i+1}, \dots, v_j, u_{k-1}, u_{k-2}, \dots, u_{i+1}, v_i$ es un ciclo en T , y esto contradice a las hipótesis. Por consiguiente solo existe un camino en T de x a y .

($T_2 \Rightarrow T_3$) Supongamos que uv es una arista en T , y sea $S = (V, E')$ el grafo con el mismo conjunto de vértices que T y con el conjunto de aristas $E' = E - uv$. Sea V_1 el conjunto de los vértices x de T para los cuales existe un único camino en T de x a v que pasa por u . Claramente, este camino debe finalizar con la arista uv , pues sino T tendría un ciclo. Sea V_2 el complemento de V_1 en V .

Cada vértice en V_1 se une por un camino en S a u , y cada vértice en V_2 se une por un camino en S a v , pero no existe camino de u a v en S . Se sigue entonces que V_1 y V_2 son las dos componentes del conjunto de vértices de S . Cada componente es conexa (por definición), y no contiene ciclos, pues sino habría ciclos en T . Es decir que las dos componentes son árboles.

($T_3 \Rightarrow T_4$) El resultado es cierto cuando $|V| = 1$, puesto que el árbol de un vértice no tiene aristas.

Supongamos que es cierto para árboles con k o menos vértices. Sea T un árbol con $|V| = k + 1$, y sea uv una arista en T . Si $T_1 = (V_1, E_1)$ y $T_2 = (V_2, E_2)$ son los árboles que se obtienen removiendo uv en T , tenemos que

$$|V_1| + |V_2| = |V|, \quad |E_1| + |E_2| = |E| - 1.$$

Aplicando la hipótesis inductiva a T_1 y T_2 obtenemos

$$|E| = |E_1| + |E_2| + 1 = |V_1| - 1 + |V_2| - 1 + 1 = |V| - 1,$$

como nosotros deseábamos. Por consiguiente el resultado es cierto para todos los enteros positivos.

($T_4 \Rightarrow T_1$) Supongamos que T satisface (T_4) pero no es árbol. Por lo tanto T tiene al menos un ciclo. Si eliminamos una arista del ciclo, el grafo sigue siendo conexo, pero con una arista menos (y la misma cantidad de vértices), es decir obtenemos un grafo $G' = (V', E')$ conexo y con $|E'| = |V'| - 2$. Pero esto contradice el resultado obtenido en el lema 5.5.2. \square

Las propiedades (T_2)-(T_3)-(T_4) nos dan maneras alternativas de definir árboles. Por ejemplo la propiedad (T_2) puede ser considerada como la propiedad que define un árbol, en vez de (T_1).

Observación. El teorema anterior nos muestra un recurso muy usado para probar que una cierta cantidad de afirmaciones son equivalentes. En el caso de 3 afirmaciones P, Q, R , uno debería probar

$$P \Leftrightarrow Q, \quad P \Leftrightarrow R, \quad Q \Leftrightarrow R,$$

y eso nos garantizaría la equivalencia entre P, Q y R . Si embargo, podemos ahorrar trabajo demostrando solamente

$$P \Rightarrow Q, \quad Q \Rightarrow R, \quad R \Rightarrow P,$$

pues si queremos probar, por ejemplo $P \Leftrightarrow Q$, esto es equivalente a probar $P \Rightarrow Q$ y $Q \Rightarrow P$. La parte $P \Rightarrow Q$ ya ha sido probada y $Q \Rightarrow P$ se deduce de $Q \Rightarrow R, R \Rightarrow P$ y la propiedad transitiva de \Rightarrow .

Para el caso de cuatro proposiciones P_1, P_2, P_3, P_4 la economía de demostraciones es aún más drástica: para probar todas las equivalencias posibles de cuatro afirmaciones hacen falta 12 demostraciones (seis de ida y seis vuelta), pero alcanza haciendo sólo 4 demostraciones:

$$P_1 \Rightarrow P_2, \quad P_2 \Rightarrow P_3, \quad P_3 \Rightarrow P_4, \quad P_4 \Rightarrow P_1.$$

§ Ejercicios

- 1) Hay seis diferentes (es decir, no isomorfos entre si) árboles con seis vértices: hacer un dibujo de ellos.
- 2) Sea $T = (V, E)$ un árbol con $|V| \geq 2$. Usando la propiedad (T_4) y el teorema 5.3.1 probar que T tiene al menos dos vértices con valencia 1.
- 3) Una *foresta* es un grafo que satisface que no contiene ciclos pero no necesariamente es conexo. Probar que si $F = (V, E)$ es una foresta con c componentes entonces

$$|E| = |V| - c.$$

5.6 COLOREO DE LOS VÉRTICES DE UN GRAFO

Un problema que se nos presenta frecuentemente en la vida moderna es aquel de confeccionar un horario para un conjunto de eventos de tal manera de evitar interferencias. Consideremos ahora un caso muy simple, que nos servirá de ejemplo para mostrar como la teoría de grafos puede ayudar al estudio de este problema.

Supongamos que deseamos hacer un horario con seis cursos de una hora, $v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6$. Entre la audiencia potencial hay gente que desea asistir a v_1 y v_2 , v_1 y v_4 , v_3 y v_5 , v_2 y v_6 , v_4 y v_5 , v_5 y v_6 y v_1 y v_6 . ¿Cuántas horas son necesarias para poder confeccionar un horario en el cual no haya interferencias?

Podemos representar la situación por un grafo Fig. 14. Los vértices corresponden a las seis clases, y las aristas indican las interferencias potenciales.

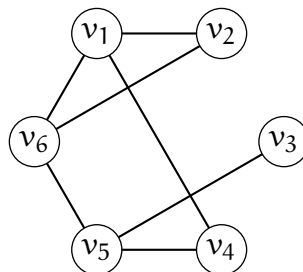


Figura 14: El grafo para un problema de horarios

Un horario el cual cumple con la condición de evitar interferencias es el siguiente:

Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4
v_1 y v_3	v_2 y v_4	v_5	v_6

En términos matemáticos, tenemos una partición del conjuntos de vértices en cuatro partes, con la propiedad que ninguna parte contiene un par de vértices adyacentes del grafo. Un descripción más gráfica utiliza la función

$$c : \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6\} \rightarrow \{1, 2, 3, 4\}$$

la cual asigna cada vértice (curso) a la hora que le corresponde. Usualmente, nosotros hablamos de colores asignados a los vértices, en vez de horas, pero claramente la naturaleza exacta de los objetos 1, 2, 3, 4 no es importante. Podemos usar el nombre de colores reales, rojo, verde, azul, amarillo, o podemos hablar del color 1, color 2, etc. Lo importante es que los vértices que son adyacentes en el grafo deben tener diferentes colores.

Definición 5.6.1. Una *coloración de vértices* de un grafo $G = (V, E)$ es una función $c : V \rightarrow \mathbb{N}$ con la siguiente propiedad:

$$c(x) \neq c(y) \quad \text{si} \quad \{x, y\} \in E.$$

El *número cromático* de G , denotado $\chi(G)$, se define como el mínimo entero k para el cual existe una coloración de vértices de G usando k -colores. En otra palabras, $\chi(G) = k$ si y sólo si existe una coloración de vértices c la cual es una función de V a \mathbb{N}_k , y k es el mínimo entero con esta propiedad.

Volviendo al ejemplo de la Fig. 14, vemos que nuestro primer intento de horario es equivalente a una coloración de vértices con cuatro colores. El mínimo número de horas necesarias será el número cromático del grafo, y la pregunta es ahora si este número es cuatro o menor que cuatro. Un rápido intento con tres colores nos da la solución de este problema:

Color 1	Color 2	Color 3
v_1	v_2 y v_5	v_3, v_4 y v_6 .

Más aún, hacen falta por lo menos tres colores, puesto que v_1 , v_2 , y v_6 son mutuamente adyacentes y por lo tanto deben tener diferentes colores. Luego concluimos que el número cromático del grafo es 3.

En general, para probar que el número cromático de un grafo dado es k , debemos hacer dos cosas:

- a) encontrar una coloración de vértices usando k colores;
- b) probar que ninguna coloración de vértices usa menos de k colores.

§ Ejercicios

- 1) Encontrar el número cromático de los siguientes grafos:

- a) un grafo completo K_n ;
 - b) un grafo cíclico C_{2r} con un número par de vértices;
 - c) un grafo cíclico C_{2r+1} con un número impar de vértices.
- 2) Determinar los números cromáticos de los grafos descritos en la Fig. 15.

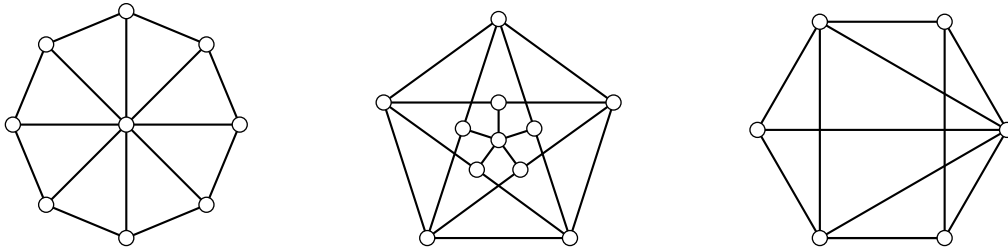


Figura 15: Encontrar el número cromático

- 3) Describir todos los grafos G tales que $\chi(G) = 1$.

5.7 ALGORITMOS GREEDY EN GRAFOS

Es bastante difícil encontrar el número cromático de un grafo dado. En realidad, no se conoce ningún algoritmo para este problema que trabaje en “tiempo polinomial”, y la mayoría de la gente cree que tal algoritmo no existe. Sin embargo hay un método simple de hacer una coloración cromática usando un “razonable” número de colores.

El método consiste en asignar los colores de los vértices en orden, de tal manera que cada vértice recibe el primer color que no haya sido ya asignado a alguno de sus vecinos. En este algoritmo insistimos en hacer la mejor elección que podemos en cada paso, sin mirar más allá para ver si esta elección nos traerá problemas luego. Un algoritmo de esta clase se llama a menudo un *algoritmo greedy* (goloso).

El algoritmo greedy para coloración de vértices es fácil de programar. Supóngase que hemos dado a los vértices algún orden v_0, v_1, \dots, v_n . Asignemos el color 0 a v_0 y luego le vamos asignando un color a los subsiguientes vértices: para cada v_i ($1 \leq i \leq n$) formamos el conjunto S de colores asignados a los vértices v_j ($0 \leq j < i$) que son adyacentes a v_i , y le damos a v_i el primer color que no está en S . (En la práctica, pueden ser usados métodos más sofisticados de manejar los datos.)

ALGORITMO GREEDY PARA COLORACIÓN DE VÉRTICES

```

# pre: 0,...,n los vértices de un grafo G
# post: devuelve v[0],...,v[n] una coloración de G
color = [] # color[j] = c dirá que el color de j es c.
for i = 0 to n:
    S = [] # S conjunto de colores asignados a los vértices j
           # (1 ≤ j < i) que son adyacentes a i (comienza vacío)
    for j = 0 to i-1:
        if j es adyacente a i:
            S.append(color[j]) # agrega el color de j a S
    k = 0
    while k in S:
        k = k + 1
    color.append(k) # Asigna el color k a i, donde k es el primer
                   # color que no esta en S.

```

Debido a que la estrategia greedy es corta de vista, el número de colores que usará será normalmente más grande que el mínimo posible. Por ejemplo, el algoritmo greedy aplicado en el grafo de Fig. 14 da precisamente la coloración de vértices con cuatro colores que fue propuesta anteriormente, luego encontramos otra coloración con tres colores. Por supuesto todo depende del orden que se elige inicialmente para los vértices. Es bastante fácil ver que si se elige el orden correcto, entonces el algoritmo greedy nos da la mejor coloración posible (ejercicio 5.7-(2)). Pero hay $n!$ órdenes posibles, y si tuviéramos que controlar cada uno de ellos, el algoritmo requeriría “tiempo exponencial”.

Más allá de esto, el algoritmo greedy es útil tanto en la teoría como en la práctica. Probaremos ahora dos teoremas por medio de la estrategia greedy.

Teorema 5.7.1. *Si G es un grafo con valencia máxima k , entonces*

- a) $\chi(G) \leq k + 1$,
- b) Si G es conexo y no regular, $\chi(G) \leq k$.

Demostración.

a) Sea v_1, v_2, \dots, v_n un ordenamiento de los vértices de G . Cada vértice tiene a lo más k vecinos, y por consiguiente el conjunto S de los colores asignados por el algoritmo greedy a los vértices v_j que son adyacentes a v_i ($1 \leq j < i$) tiene como máximo cardinal k . Por consiguiente al menos uno de los colores $1, 2, \dots, k + 1$ no está en S , y el algoritmo greedy asigna entonces el primero de estos a v_i .

b) Para probar esta parte debemos elegir un orden especial de los vértices, comenzando con v_n y yendo hacia atrás. Puesto que G tiene valencia máxima k y es no regular, existe al menos un vértice G cuya valencia es menor que k : llamémoslo v_n . Listemos los vecinos de v_n como $v_{n-1}, v_{n-2}, \dots, v_{n-r}$; hay a lo más $k - 1$ de ellos. A continuación listemos los vecinos de v_{n-1} (excepto v_n y sus vecinos), y observemos que como la valencia es a lo más k hay a lo más $k - 1$ de estos vértices. A continuación listemos los vecinos de v_{n-2} que no hayan sido listados antes, y así siguiendo. Puesto que G es conexo, en determinado momento podremos listar todos los vértices de G . Más aún, el método de construcción asegura que cada vértice es adyacente a lo más a $k - 1$ de sus predecesores en el orden v_1, v_2, \dots, v_n .

Usando el mismo argumento que en la parte *a)* (pero para este orden) se sigue que el algoritmo greedy requerirá a lo más k colores. Luego $\chi(G) \leq k$. \square

La parte *b)* del teorema es falsa si permitimos que G sea regular. El lector que haya respondido correctamente al ejercicio 1 de la sección 5.6 será capaz de dar dos ejemplos de este hecho: los grafos cíclicos de longitud impar tienen grado 2 y número cromático 3 y los grafos completos de $k + 1$ vértices tienen grado k y número cromático $k + 1$ colores. Si embargo, puede ser demostrado que estos son los únicos contraejemplos.

Otra consecuencia útil del algoritmo greedy se refiere a grafos G son $\chi(G) = 2$. Para tales grafos, los conjuntos V_1 y V_2 de vértices de colores 1 y 2 respectivamente, forman una partición de V , con la propiedad que cada arista tiene un vértice en V_1 y el otro en V_2 . Por esta razón, cuando $\chi(G) = 2$, diremos que G es *bipartito*. Una coloración de vértices con dos colores de un cubo se ilustra en la Fig. 16, junto a un dibujo alternativo que enfatiza la naturaleza bipartita del grafo. Usualmente usaremos esta clase de dibujo cuando trabajemos con grafos bipartitos.

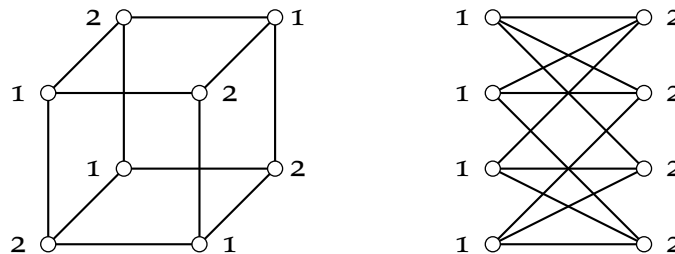


Figura 16: El cubo es un grafo bipartito

Teorema 5.7.2. *Un grafo es bipartito si y sólo si no contiene ciclos de longitud impar.*

Demostración. Si hay un ciclo de longitud impar, entonces se requieren tres colores, solamente para colorear este ciclo, y el número cromático del grafo es por ende al menos tres. Luego si el grafo es bipartito, no puede tener ciclos de longitud impar.

Recíprocamente, supongamos que G es un grafo sin ciclos de longitud impar. Construiremos un orden de G para el cual el algoritmo greedy producirá una coloración de vértices con dos colores. Elijamos cualquier vértice y llamémoslo v_1 ; diremos que v_1 está en el *nivel* 0. A continuación, listemos la lista de vecinos de v_1 (excepto v_1), llamémoslos v_2, v_3, \dots, v_r ; diremos que estos vértices están en el *nivel* 2. Continuando de esta manera, definimos el *nivel* l como todos aquellos vértices adyacentes a los del *nivel* $l-1$, exceptuando aquellos previamente listados en el *nivel* $l-2$. Cuando ningún nuevo vértice puede ser agregado de esta forma, obtenemos la componente G_0 de G (si G es conexo $G_0 = G$).

El hecho crucial producido por este orden es que un vértice del nivel l solo puede ser adyacente a vértices de los niveles $l-1$ y $l+1$, y no a vértices del mismo nivel. Supongamos que x e y son vértices en el mismo nivel; entonces ellos son unidos por caminos de igual longitud m a algún vértice z de un nivel anterior, y los caminos pueden ser elegidos de tal manera que z sea el único vértice común Fig. 17. Si x e y fueran adyacentes, habría un ciclo de longitud $2m+1$, lo cual contradice la hipótesis.

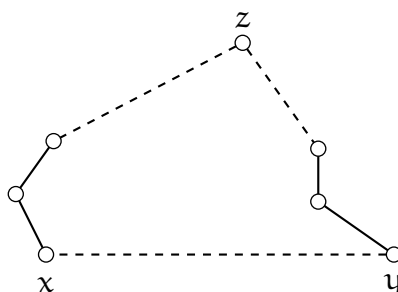


Figura 17: Vértices adyacentes en el mismo nivel inducen un ciclo impar

Se deduce entonces que el algoritmo greedy asigna el color 1 a los vértices en el nivel $0, 2, 4, \dots$, y el color 2 a los vértices en los niveles $1, 3, 5, \dots$. Por consiguiente $\chi(G_0) = 2$. Repitiendo el mismo argumento para cada componente de G obtenemos el resultado deseado. \square

§ Ejercicios

- 1) Encontrar órdenes de los vértices del grafo del cubo Fig. 16 para los cuales el algoritmo greedy requiera 2, 3 y 4 colores respectivamente.

- 2) Probar que para cualquier grafo G existe un orden de los vértices para el cual el algoritmo greedy requiera $\chi(G)$ colores. [Ayuda: use un coloreado de vértices de $\chi(G)$ colores para definir el orden.]
- 3) Denotar $e_i(G)$ el número de vértices del grafo G cuya valencia es estrictamente mayor que i . Usar el algoritmo greedy para probar que si $e_i(G) \leq i + 1$ para algún i , entonces $\chi(G) \leq i + 1$.
- 4) El grafo M_r ($r \geq 2$) se obtiene a partir del grafo cíclico C_{2r} añadiendo aristas extras que unen los vértices opuestos. Probar que
 - a) M_r es bipartito cuando r es impar,
 - b) $\chi(M_r) = 3$ cuando r es par y $r \neq 2$,
 - c) $\chi(M_2) = 4$.

ÁRBOLES (*)

6.1 CONTANDO LAS HOJAS DE UN ÁRBOL CON RAÍZ

Recordemos que un árbol es un grafo conexo que no contiene ciclos. Los árboles aparecen en contextos diferentes y a menudo un vértice del árbol se distingue de los otros. Por ejemplo en el árbol genealógico que describe la descendencia de un rey, nosotros podemos enfatizar la posición especial del rey poniéndolo en lo más alto del árbol. En general, nosotros llamaremos al vértice notable la *raíz* del árbol, y a un árbol con una raíz específica lo llamaremos *árbol con raíz*. (Esta terminología, aunque estándar, tiene el defecto que en la representación pictórica la raíz aparece en lo más alto del árbol y el árbol 'crece' hacia abajo.)

Para el estudio de un árbol con raíz es natural ubicar los vértices en niveles, de la misma manera que lo hicimos para los grafos bipartitos en la sección 5.7. Diremos que el vértice raíz es el *nivel 0* y que sus vecinos forman el *nivel 1*. Para cada $k \geq 2$, el *nivel k* está formado por aquellos vértices que son adyacentes a vértices del nivel $k - 1$, excepto aquellos que ya pertenecen al nivel $k - 2$. El árbol con raíz representado en la Fig. 18 puede ser dibujado nuevamente como se lo muestra a la derecha de manera de visualizar los niveles.

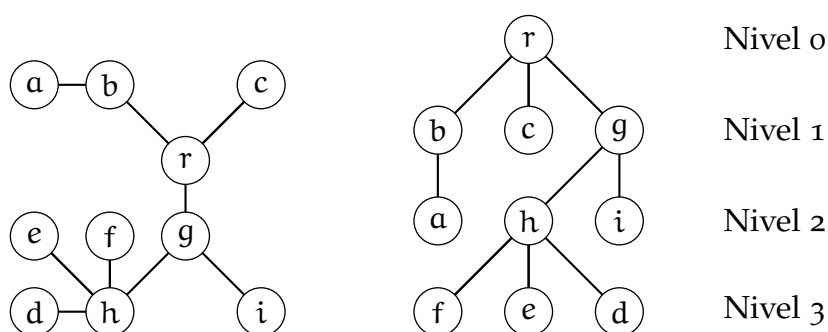


Figura 18: Un árbol con raíz y sus niveles

Un vértice en un árbol con raíz se llama una *hoja* si pertenece al nivel i ($i \geq 0$) y no es adyacente a ningún vértice del nivel $i + 1$. Un vértice que no es una hoja es llamado *interno*. La *altura* de un árbol con raíz es el máximo

valor de k para el cual el nivel k es no vacío. Luego el árbol de la Fig. 18 tiene seis hojas, cuatro vértices internos y su altura es tres.

Las dos propiedades que usamos en la sección 5.5 para definir un árbol, ser un grafo conexo y sin ciclos, tienen consecuencias obvias cuando pensamos los vértices por niveles. Puesto que todo árbol es conexo entonces cada vértice pertenece a algún nivel. Más importante aún, puesto que un árbol no tiene ciclos cada vértice v del nivel i es adyacente a uno y solo uno u del nivel $i - 1$. A veces enfatizaremos esto diciendo que u es el *padre* de v o que v es un *hijo* de u . Cada vértice, excepto el raíz, tiene un único padre, pero un vértice puede tener una cantidad arbitraria de hijos (incluso ninguno). Claramente, un vértice es una hoja si y solo si no tiene hijos.

En muchas aplicaciones ocurre que cada padre (vértice interno) tiene la misma cantidad de hijos. Cuando cada padre tiene m hijos diremos que el árbol es *m-ario*, en particular cuando $m = 2$ diremos que el árbol es *binario* y cuando $m = 3$ diremos que es *ternario*.

Teorema 6.1.1. *La altura de un árbol con raíz m-ario con l hojas es por lo menos $\log_m l$.*

Demostración. Puesto que

$$h \geq \log_m l \quad \Leftrightarrow \quad m^h \geq l$$

es suficiente probar la afirmación equivalente: todo árbol con raíz m -ario de altura h tiene a lo más m^h hojas. La demostración es por inducción sobre h .

Claramente la afirmación es verdadera cuando $h = 0$ puesto que en este caso el árbol es solo un vértice (la raíz) que es una hoja. Supongamos que la afirmación es verdadera cuando $0 \leq h \leq h_0$ y sea T un árbol con raíz m -ario de altura $h_0 + 1$. Si eliminamos la raíz y las aristas a las cuales pertenece obtenemos m árboles T_1, \dots, T_m cuyas raíces son los vértices del nivel 1 de T . Cada T_i es un árbol con raíz de altura h_0 o menos, luego por hipótesis inductiva tiene a lo más m^{h_0} hojas. Pero las hojas de T son precisamente las hojas de los árboles T_1, \dots, T_m y por consiguiente el número de hojas es a lo más $m \cdot m^{h_0} = m^{h_0+1}$.

Por el principio de inducción completa se sigue que la afirmación es verdadera para todo $h \geq 0$. \square

Puesto que $\log_m l$ no es generalmente un número entero, el teorema anterior puede ser mejorado un poco. Por ejemplo si $m = 3$ y $l = 10$ la desigualdad

$$h \geq \log_m l = 2,0959 \dots$$

implica que $h \geq 3$. En general podemos decir que

$$h \geq \lceil \log_m l \rceil,$$

donde $\lceil x \rceil$ denota el menor entero z tal que $z \geq x$.

Una aplicación frecuente del teorema 6.1.1 es en los *árboles de decisión*. Cada vértice interno de un árbol de decisión representa una decisión y los posibles resultados de esa decisión son las aristas que unen ese vértice con los vértices del nivel siguiente. Los posibles resultados finales del procedimiento son las hojas del árbol. Si el resultado de una decisión puede ser solo verdadero o falso entonces tenemos un árbol binario. A continuación daremos un ejemplo con un árbol ternario.

Ejemplo 6.1.2. (El problema de la moneda falsa) Supongamos que tenemos una moneda genuina con la etiqueta 0 y que tenemos otras r monedas indistinguibles de 0 por la apariencia excepto que tienen las etiquetas $1, 2, \dots, r$. Se sospecha que una moneda podría ser falsa, es decir o más liviana o más pesada. Probemos que son necesarias al menos $\lceil \log_3(2r + 1) \rceil$ pesadas en una balanza para decidir que moneda (si hay alguna) es falsa y en ese caso ver si es más pesada o liviana. Mostremos un procedimiento que use exactamente este número de pesadas cuando $r = 4$.

Solución. Hay $2r + 1$ posibles resultados finales u hojas en el árbol de decisión:

$$B, 1P, 1L, \dots, rP, rL;$$

donde B significa que todas las monedas son buenas, iL significa que la moneda i es más liviana y iP que es más pesada. El árbol de decisión es ternario, puesto que hay tres posibles resultados de cada decisión (es decir de cada pesada entre un grupo de monedas y otro). Estos son:

- $<$: el grupo de la izquierda es más liviano
- $=$: los dos grupos pesan igual
- $>$: el grupo de la izquierda es más pesado.

Por consiguiente la altura del árbol de decisión es al menos $\lceil \log_3(2r + 1) \rceil$.

Cuando $r = 4$ entonces $\lceil \log_3(2r + 1) \rceil = 2$, y la solución con dos pesadas se gráfica en la Fig. 19

□

§ Ejercicios

- 1) En la siguiente tabla $n_5(h)$ es el número de árboles con raíz no isomorfos que tienen 5 vértices y altura h . (Dos árboles con raíz son isomorfos

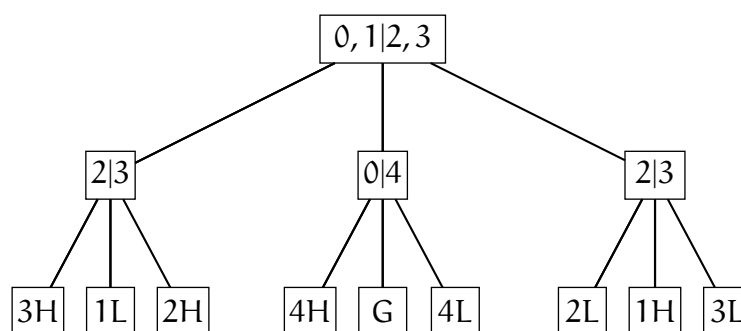


Figura 19: Solución del problema de la moneda falsa cuando $r = 4$

si hay un isomorfismo de grafos, sin considerar la raíz, que lleva la raíz de uno en la del otro.) Verificar la tabla construyendo los ejemplos para cada caso.

$$\begin{array}{rcl} h: & 1 & 2 & 3 & 4 \\ n_5(h): & 1 & 4 & 3 & 1 \end{array}$$

- 2) Si se consideran los árboles comunes (sin raíz), ¿cuál es el número de árboles no isomorfos con 5 vértices? Hacer una lista y controlar que la lista del ejercicio anterior sea completa.
- 3) Construir dos árboles con raíz no isomorfos ambos con 12 vértices, 6 hojas y altura 4.
- 4) Suponer que se organiza un campeonato de fútbol-5 donde participan 20 equipos. El campeonato es por eliminación simple y no hay empates. Construir un esquema para el torneo basado en un árbol con raíz y probar que son necesarias al menos 5 rondas.
- 5) ¿Cuál es la cota inferior en el número de pesadas necesarias en el problema de la moneda falsa (ver el ejemplo 6.1.2) cuando son seis monedas? Desarrollar un esquema que logre este número de pesadas.
- 6) Considerar la siguiente variante del problema de la moneda falsa. Hay ocho monedas y sabemos que hay exactamente una que es más liviana. Todas las demás son genuinas pero no hay ninguna moneda con la etiqueta 0. Encontrar una cota inferior teórica del número de pesadas necesarias para detectar la moneda falsa y probar que este número puede ser alcanzado.

6.2 ÁRBOLES EXPANDIDOS Y EL PROBLEMA MST

Definición 6.2.1. Sea $G = (V, E)$ es un grafo conexo y T es un subconjunto de E tal que

- a) cada vértice de G pertenece a una arista en T ;
- b) las aristas de T forman un árbol.

En este caso decimos que T es un *árbol expandido* para G .

Por ejemplo, un árbol expandido para el grafo de la Fig. 20 se indica con las líneas más gruesas.

Es fácil hacer “crecer” un árbol expandido: tome un vértice arbitrario v del “árbol parcial” inicial y agregue aristas con un extremo en v y el otro extremo que no pertenezca al árbol parcial inicial. El árbol expandido de la Fig. 20 puede construirse haciéndolo crecer desde el vértice a y conectando los otros vértices en el orden b, c, e, f, d, h, g , usando las aristas $ab, ac, ae, cf, fd, fh, hg$. En general, si hay n vértices nosotros deberemos hacer $n - 1$ pasos, después de los cuales tendremos $1 + (n - 1) = n$ vértices y $n - 1$ aristas (el cual es el número correcto de acuerdo al teorema 5.5.3).

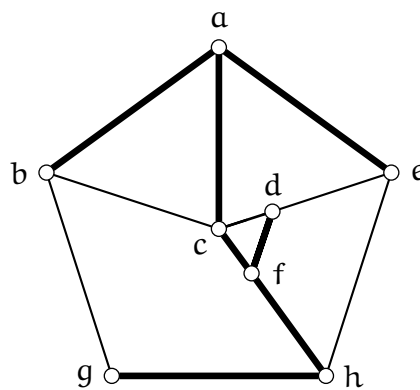


Figura 20: Un grafo y uno de sus árboles expandidos

Verifiquemos que el método siempre funciona: sea S el conjunto de vértices del árbol parcial que se ha logrado en un paso intermedio, es decir que S no es ni vacío ni todo V . Si no existe una arista que tenga un extremo en S y el otro en el complemento \bar{S} , entonces no existe un camino entre S y \bar{S} y por lo tanto G es desconexo, lo cual contradice las hipótesis. Por consiguiente siempre existe una arista disponible en cada etapa de la construcción.

Los árboles expandidos son útiles en muchos contextos. Por ejemplo, supongamos que cierta cantidad de ciudades deben ser unidas de a pares por gasoductos de tal forma que quede una red de gasoductos conexa. Algunos pares de ciudades puede ser imposible unirlos por razones geográficas y cada posible conexión tiene asociada un costo de construcción. Formalmente, tenemos un grafo $G = (V, E)$ cuyos vértices son ciudades y sus aristas son las posibles conexiones. Además tenemos una función w de E a \mathbb{N} de tal

forma que $w(e)$ representa el costo de construcción de la arista e . Diremos que G y w es un *grafo con pesos* y que w es la *función de pesos*.

En el problema del gasoducto lo que se pretende es construir una red conexa al mínimo costo. Un red de ese tipo corresponde a un árbol expandido T para G cuyo peso total

$$w(T) = \sum_{e \in T} w(e)$$

es lo mas pequeño posible. Nos referiremos a este problema como el *problema MST* (del inglés MST = minimum spanning tree = árbol expandido mínimo) para el grafo con pesos G .

Dado que los valores de w son enteros positivos, claramente el problema MST debe tener solución, puesto que hay solo un número finito de árboles expandidos T para G y cada uno de ellos da un valor entero positivo $w(T)$. En otras palabras, existe un árbol expandido mínimo T_0 tal que

$$w(T_0) \leq w(T)$$

para todos los árboles expandidos T de G . Sin embargo puede haber varios con la misma propiedad.

Un algoritmo simple para el problema MST se basa en aplicar la estrategia greedy al método explicado anteriormente. Específicamente: en cada paso se agrega la arista “más barata” que une un nuevo vértice al árbol parcial. (Si hay varias aristas con la misma propiedad se selecciona una de ellas.) Por ejemplo, si en la Fig. 21 comenzamos con u , luego debemos agregar aristas en el orden uv , ux , uy , yz . Por otro lado, si comenzáramos por y , entonces agregamos las aristas en el orden yz , yu , uv , ux .

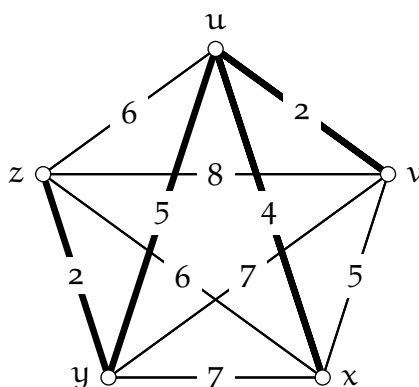


Figura 21: Un árbol expandido mínimo

El algoritmo puede ser descrito informalmente en los siguientes pasos:

- Inicializar un árbol con un sólo vértice (elegido arbitrariamente).

- Agrandar el árbol agregando una arista: entre las aristas que conectan al árbol con vértices que aún no están en el árbol, elegir una de peso mínimo.
- Repetir el paso anterior hasta que todos los vértices estén en el árbol

Un primera impresión nos dice que sería bastante sorprendente que el algoritmo greedy funcione para el problema MST, especialmente cuando recordamos que el algoritmo greedy para el problema de coloración de vértices no siempre produce una coloración con el menor número posible de colores. Pero en el caso del problema MST se tiene más suerte.

Teorema 6.2.2. *Sea $G = (V, E)$ grafo conexo con función de pesos $w : E \rightarrow \mathbb{N}$, y supongamos que T es el árbol expandido para G construido por el algoritmo greedy. Entonces*

$$w(T) \leq w(U)$$

para todo árbol expandido U de G .

Demostración. Denotemos e_1, e_2, \dots, e_{n-1} las aristas de T en el orden en que aplicamos el algoritmo greedy. Si $U = T$ el resultado es obviamente verdadero. Si $U \neq T$ entonces hay aristas de T que no están en U y supongamos que la primera es e_k . Denotemos S el conjunto de vértices en el árbol parcial que se construye por el greedy justo antes de agregar e_k y sea $e_k = xy$ donde x está en S e y no está en S . Puesto que U es un árbol expandido existe un camino de x a y y si uno viaja a través de este camino encontrará una arista e^* con un vértice en S y el otro no. Ahora bien, cuando e_k es seleccionada para T en el algoritmo greedy, e^* es también candidata a ser seleccionada, pero no lo es. Por consiguiente debemos tener que $w(e^*) \geq w(e_k)$. Si e^* aparece en T , entonces por el razonamiento anterior es una arista que viene después (en el orden dado) de e_k .

El resultado de remover e^* de U y reemplazarla por e_k es un árbol expandido U_1 , para el cual

$$w(U_1) = w(U) - w(e^*) + w(e_k) \leq w(U).$$

Más aún, la primera arista de T que no está en U_1 aparece después de e_k en el orden dado. En consecuencia podemos repetir el procedimiento obteniendo una sucesión de árboles expandidos U_1, U_2, \dots , con la propiedad que cada uno tiene una secuencia inicial de aristas en común con las aristas de T más larga que el anterior y además $w(U_i) \geq w(U_{i+1})$. El proceso termina cuando obtenemos un árbol expandido U_r igual a T y tenemos

$$w(T) = w(U_r) \leq w(U_{r-1}) \leq \dots \leq w(U_1) \leq w(U),$$

como queríamos demostrar. □

En forma más detallada, el algoritmo puede ser implementado con el siguiente pseudocódigo:

ALGORITMO DE PRIM

```
# pre: G grafo con vértices 0,...,n y pesos w(i,j)
#      (w(i,j) = infinito si ij no es arista de G)
# post: devuelve F un MST de G
Q = [1,...,n] # lista de vértices aún no utilizados en el MST
S = [0] # lista de vértices ya utilizados en el MST
# L = [[k, 0, pesos[k][0]] : k en Q]
# L se ira modificando de tal forma que si
# Q = [u0,...,uk] no utilizados en F
# S = utilizados en F
# L = [[ui,vi,w(ui,vi)]: 0 <= i <= k, vi in S tq w(ui,vi) mínimo]
F[i] = [], 0 <= i <= n # grafo con vértices 0,...,n y sin aristas.
while Q != []:
    L.sort(por coordenada 2) # ordena L por pesos
    [u,v,p] = L[0]
    # u en Q, v en S, tal que p = w(u,v) es mínimo
    F.agregar_arista({u, v})
    L.remove([u, v, w(u,v)])
    Q.remove(u)
    S.append(u)
    for i in range(len(L)):
        u' = L[i][0]
        if w[u'][u] < L[i][2]:
            L[i][1] = u
            L[i][2] = w[u'][u]
    # el for actualiza la lista L
return F
```

Notemos que terminamos el proceso no cuando S contiene todos los vértices, si no cuando, de manera equivalente, su complemento Q queda vacío. Existe una forma de ir viendo el progreso del algoritmo por medio de una tabla de tres columnas.

I	II	III
x	y	w(xy)
.	.	.
.	.	.
.	.	.

La Columna I lista los vértices que no están en S, que es el conjunto de vértices ya conectados al árbol parcial. Para cada x en la Columna I la correspondiente entrada y en la Columna II es un vértice en S tal que la

arista xy es una de las aristas más baratas que unen el vértice x con alguno de S . La Columna III contiene el valor $w(xy)$.

En el i -ésimo paso de la construcción tenemos que $|S| = i$ y hay $n - i$ vértices en la Columna I. Tenemos entonces que seleccionar una de las entradas más pequeñas de la Columna III, digamos $w(x_0y_0)$, y esto conlleva $n - i - 1$ comparaciones. Ahora debemos actualizar la tabla debido a que agregamos x_0 a S por medio de la arista x_0y_0 . Primero debemos borrar la fila cuya primera posición tiene a x_0 . Después en cada fila debemos verificar si la entrada correspondiente a la Columna II puede ser reemplazada por x_0 o no. Es decir para la fila " $x \quad y \quad w(xy)$ " debemos verificar si xx_0 es arista y si lo fuera y además $w(xx_0) < w(xy)$, entonces debemos reemplazar y por x_0 . Esto agrega otras $n - i - 1$ comparaciones. El número total de comparaciones requeridas es

$$\sum_{i=1}^{n-1} 2(n - i - 1) = (n - 1)(n - 2).$$

Esto nos dice que para encontrar un MST de un grafo deben hacerse alrededor de n^2 operaciones.

§ Ejercicios

- 1) Encontrar árboles expandidos para el cubo Fig. 16 y para el grafo de Petersen.
- 2) Mostrar esquemáticamente todos los árboles expandidos del grafo completo K_4 (hay 16).
- 3) Usar el algoritmo greedy para encontrar un MST del grafo representado en la Fig. 22. ¿Es en este caso el MST único?

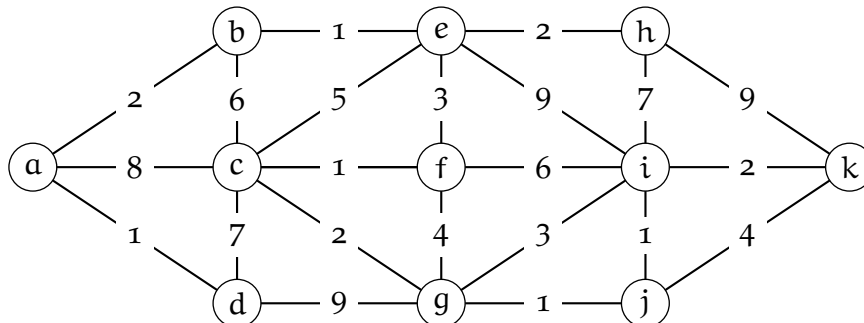


Figura 22: Encontrar el MST

- 4) Sea G un grafo con pesos cuyos vértices son x, a, b, c, d, e, f y cuyas aristas y pesos vienen dados por la siguiente tabla:

x_a	x_b	x_c	x_d	x_e	x_f	ab	bc	cd	de	ef	fa
6	3	2	4	3	7	6	2	3	1	8	6.

Encontrar todos los árboles expandidos mínimos para G .

- 5) Suponer que T es un árbol expandido mínimo en un grafo con pesos K y sea e^* una arista de K que no es de T . Sea e una arista de T perteneciente al único camino en T que une los vértices de e^* . Probar que $w(e) \leq w(e^*)$.
- 6) Escribir un “programa” para el algoritmo greedy basado en el método tabular mostrado más arriba.

Parte III

APÉNDICES

PERMUTACIONES

A.1 PERMUTACIONES

Recordemos que una *permutación* de un conjunto finito no vacío X es una biyección de X en X . (Frecuentemente tomamos X como $[[1, n]] = \{1, 2, \dots, n\}$.) Por ejemplo una permutación típica de $[[1, 5]]$ es la función α definida por las ecuación

$$\alpha(1) = 2, \quad \alpha(2) = 4, \quad \alpha(3) = 5, \quad \alpha(4) = 1, \quad \alpha(5) = 3.$$

Denotemos el conjunto de todas las permutaciones de $[[1, n]]$ con S_n . Por ejemplo, S_3 contiene las $3! = 6$ permutaciones siguientes:

$$\begin{array}{cccccc} \begin{array}{ccc} 1 & 2 & 3 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 1 & 2 & 3 \end{array} & \begin{array}{ccc} 1 & 2 & 3 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 1 & 3 & 2 \end{array} & \begin{array}{ccc} 1 & 2 & 3 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 2 & 1 & 3 \end{array} & \begin{array}{ccc} 1 & 2 & 3 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 2 & 3 & 1 \end{array} & \begin{array}{ccc} 1 & 2 & 3 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 3 & 1 & 2 \end{array} & \begin{array}{ccc} 1 & 2 & 3 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 3 & 2 & 1 \end{array} \end{array}$$

En la práctica, usualmente asignamos alguna interpretación concreta a un elemento de S_n . Como vimos en la sección 2.3, podemos usar la interpretación “selecciones ordenadas sin repetición” donde, en este caso seleccionamos los elementos de $\{1, 2, 3, \dots, n\}$ en algún orden hasta que no queda ninguno. Una interpretación relacionada es que una permutación efectúa un *reacomodamiento* de $\{1, 2, 3, \dots, n\}$; por ejemplo, la permutación α vista más arriba efectúa el reacomodamiento de 12 345, en 24 513, así:

$$\begin{array}{ccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 2 & 4 & 5 & 1 & 3 \end{array}$$

En algunas circunstancias es conveniente mirar una permutación y el correspondiente reacomodamiento como la misma cosa, pero esto puede traer dificultades si debemos considerar sucesivos reacomodamientos. Es importante tener en cuenta que

una permutación es una función con ciertas características.

Cuando las permutaciones son tratadas como funciones es claro como deben combinarse. Consideremos α la permutación de $[[1, 5]]$ antes mencionada, y sea β la permutación de $[[1, 5]]$ dada por

$$\beta(1) = 3, \quad \beta(2) = 5, \quad \beta(3) = 1, \quad \beta(4) = 4, \quad \beta(5) = 2.$$

La función compuesta $\beta\alpha$ es la permutación definida por $(\beta\alpha)(i) = \beta(\alpha(i))$ ($1 \leq i \leq 5$), esto es

$$\beta\alpha(1) = 5, \quad \beta\alpha(2) = 4, \quad \beta\alpha(3) = 2, \quad \beta\alpha(4) = 3, \quad \beta\alpha(5) = 1.$$

(Recordemos que, como siempre, $\beta\alpha$ significa “primero α , entonces β ”). En términos de reacomodamientos tenemos

$$\begin{array}{c} \alpha \\ \beta \end{array} \begin{array}{ccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 2 & 4 & 5 & 1 & 3 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 5 & 4 & 2 & 3 & 1 \end{array}$$

Existen cuatro características de la composición de permutaciones de gran importancia, y están listadas en el próximo teorema.

Teorema A.1.1. *Las siguientes propiedades valen en el conjunto S_n de todas las permutaciones de $\{1, 2, 3, \dots, n\}$.*

a) *Si π y σ pertenecen a S_n , entonces $\pi\sigma$ también.*

b) *Para cualesquiera permutaciones π, σ, τ en S_n ,*

$$(\pi\sigma)\tau = \pi(\sigma\tau).$$

c) *La función identidad, denotada por id y definida por $\text{id}(r) = r$ para todo r en \mathbb{N}_n , es una permutación y para cualquier σ en S_n , tenemos*

$$\text{id} \sigma = \sigma \text{id} = \sigma.$$

d) *Para toda permutación π en S_n hay una permutación inversa π^{-1} en S_n tal que*

$$\pi\pi^{-1} = \pi^{-1}\pi = \text{id}.$$

Demostración. Todas las afirmaciones se deducen de propiedades conocidas de funciones en general y funciones biyectivas en particular. Por otro lado, es fácil convencerse de la validez de las mismas mirando las permutaciones como reacomodamiento de elementos. \square

Es conveniente tener una notación más compacta para las permutaciones. Consideremos otra vez la permutación α de $\{1, 2, 3, 4, 5\}$, y notemos en particular que

$$\alpha(1) = 2, \quad \alpha(2) = 4, \quad \alpha(4) = 1.$$

Así α lleva 1 a 2, 2 a 4 y 4 a 1, y por esta razón decimos que los símbolos 1, 2, 4 forma un *ciclo* (de longitud 3). Del mismo modo, los símbolos 3 y 5 forman un ciclo de longitud 2, y escribimos:

$$\alpha = (1\ 2\ 4)(3\ 5).$$

Esta es la *notación cíclica* para α . Cualquier permutación π puede ser escrita cíclicamente de la siguiente manera:

- comencemos con algún símbolo (digamos el 1) y veamos el efecto de π sobre él y sus sucesores hasta que alcancemos el 1 nuevamente;
- elijamos un símbolo que todavía no haya aparecido y construyamos el ciclo que se deriva de él;
- repitamos el procedimiento hasta que se terminen los símbolos.

Por ejemplo, la permutación β definida antes tiene la notación cíclica

$$\beta = (1\ 3)(2\ 5)(4),$$

donde observamos que el símbolo 4 forma un ciclo “degenerado” por sí solo, puesto que $\beta(4) = 4$. En algunas ocasiones podemos omitir estos ciclos de longitud 1 cuando escribimos una permutación en notación cíclica, puesto que corresponden a símbolos que no son afectados por la permutación. Sin embargo, usualmente es útil *no* adoptar esta convención hasta que uno se familiariza con la notación.

Aunque la representación de una permutación en notación cíclica es esencialmente única, hay dos maneras obvias en las que podemos cambiar la notación sin alterar la permutación. Primero, cada ciclo puede empezar en cualquiera de sus símbolos; por ejemplo $(7\ 8\ 2\ 1\ 3)$ y $(1\ 2\ 7\ 8\ 2)$ describen el mismo ciclo. Segundo, el orden de los ciclos no es importante; por ejemplo $(1\ 2\ 4)(3\ 5)$ y $(3\ 5)(1\ 2\ 4)$ denotan la misma permutación. Pero las características importantes son el número de ciclos, la longitud del ciclo, y la disposición de los símbolos dentro de los ciclos, y éstas están determinadas de manera única. Por eso, la rotación cíclica nos dice bastantes cosas útiles sobre una permutación.

Ejemplo A.1.2. Cartas numeradas del 1 al 12 son distribuidas en una mesa en la manera en que se muestra en la parte izquierda de la tabla que sigue. Luego las cartas son levantadas por filas (de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo) y se redistribuyen con el mismo arreglo, pero por columnas, no por filas (de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha), apareciendo como se muestra en la parte derecha de la tabla.

1	2	3	1	5	9
4	5	6	2	6	10
7	8	9	3	7	11
10	11	12	4	8	12

¿Cuántas veces debe repetirse este procedimiento hasta que las cortas aparezcan dispuestas como estaban inicialmente?

Solución. Sea π la permutación que efectúa el reordenamiento; esto es $\pi(i) = j$ si la carta j aparece en la posición previamente ocupada por la carta i . Trabajando con la notación cíclica para π encontramos que

$$\pi = (1)(2\ 5\ 6\ 10\ 4)(3\ 9\ 11\ 8\ 7)(12).$$

Los ciclos degenerados (1) y (12) indican que las cartas 1 y 12 nunca cambian de posición. Los otros ciclos tienen longitud 5, así que cuando el proceso se haya realizado 5 veces las cartas reaparecerán en sus posiciones originales. Otra forma de expresar el resultado es decir que $\pi^5 = \text{id}$, donde π^5 representa las cinco repeticiones de la permutación π . \square

§ Ejercicios

- 1) Escribir en notación cíclica la permutación que realiza el siguiente reordenamiento:

$$\begin{array}{cccccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 3 & 5 & 7 & 8 & 4 & 6 & 1 & 2 & 9 \end{array}$$

- 2) Sean σ y τ las permutaciones de $[[1, 8]]$ cuyas representaciones en la notación cíclica son

$$\sigma = (1\ 2\ 3)(4\ 5\ 6)(7\ 8), \quad \tau = (1\ 3\ 5\ 7)(2\ 6)(4)(8).$$

Escribir en notación cíclica $\sigma\tau$, $\tau\sigma$, σ^2 , σ^{-1} , τ^{-1} .

- 3) Resolver el problema presentado en el ejemplo A.1.2 cuando hay 20 cartas acomodadas en 5 filas de 4.
- 4) Probar que hay exactamente tres elementos de S_4 que tienen dos ciclos de longitud 2, escritos en la notación cíclica.
- 5) Sea K el subconjunto de S_4 que contiene la identidad y las tres permutaciones descritas en el ejercicio previo. Escribir la “tabla de multiplicación” para K , interpretando la multiplicación como la composición de permutaciones.
- 6) Calcular en número total de permutaciones σ de $[[1, 6]]$ que satisfacen $\sigma^2 = \text{id}$ y $\sigma \neq \text{id}$.
- 7) Sean α y β permutaciones de $[[1, 9]]$ cuyas representaciones en la notación cíclica son:

$$\alpha = (1\ 2\ 3\ 7)(4\ 9)(5\ 8)(6), \quad \beta = (1\ 3\ 5)(2\ 4\ 6)(7\ 8\ 9).$$

Escribir en notación cíclica $\alpha\beta$, $\beta\alpha$, α^2 , β^2 , α^{-1} , β^{-1} .

- 8) Sea $X_1 = \{0, 1\}$, y para $i \geq 2$ definamos X_i como el conjunto de subconjuntos de X_{i-1} . Encontrar el valor más pequeño para el cual $|X_i| > 10^{100}$.
- 9) Por cada entero i en el rango $1 \leq i \leq n-1$ definimos τ_i como la permutación de $[1, n]$ que intercambia i e $i+1$ y no afecta los otros elementos. Explícitamente

$$\tau_i = (1)(2) \cdots (i-1)(i \ i+1)(i+2) \cdots (n).$$

Probar que toda permutación de $[1, n]$ puede ser expresada en términos de $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n-1}$.

- 10) Una permutación de $[1, n]$ que tenga solo un ciclo (necesariamente de longitud n) es llamada *cíclica*. Probar que hay $(n-1)!$ permutaciones cíclicas de $[1, n]$.
- 11) Un mazo de 52 cartas es dividido en dos partes iguales y luego se alternan las cartas de una y otra parte. Es decir si la numeración original era $1, 2, 3, \dots, 54$, el nuevo orden es $1, 27, 2, 28, \dots$ ¿Cuántas veces se debe repetir este procedimiento para obtener de nuevo el mazo original?

EL PRINCIPIO DEL TAMIZ

B.1 EL PRINCIPIO DEL TAMIZ

El principio más básico del conteo (proposición 2.1.2) dice que $|A \cup B|$ es la suma de $|A|$ y $|B|$, cuando A y B son conjuntos disjuntos. Si A y B no son disjuntos, cuando sumamos $|A|$ y $|B|$ estamos contando $A \cap B$ dos veces. Entonces, para obtener la respuesta correcta debemos restar $|A \cap B|$:

$$|A \cup B| = |A| + |B| - |A \cap B|.$$

Un método similar puede aplicarse a tres conjuntos. Cuando sumamos $|A|$, $|B|$ y $|C|$, los elementos de $A \cap B$, $B \cap C$, y $C \cap A$ son contados dos veces (si no están en los tres conjuntos). Para corregir esto, restamos $|A \cap B|$, $|B \cap C|$ y $|C \cap A|$. Pero ahora los elementos de $A \cap B \cap C$, contados originalmente tres veces, han sido descontados tres veces. Luego, para conseguir la respuesta correcta, debemos sumar $|A \cap B \cap C|$. Así

$$|A \cup B \cup C| = \alpha_1 - \alpha_2 + \alpha_3,$$

donde

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= |A| + |B| + |C|, & \alpha_2 &= |A \cap B| + |B \cap C| + |C \cap A|, \\ \alpha_3 &= |A \cap B \cap C|.\end{aligned}$$

Este resultado es un caso simple de lo que suele ser llamado, por razones obvias, el principio de inclusión y exclusión. También se lo llama el *principio del tamiz*.

Teorema B.1.1. Si A_1, A_2, \dots, A_n son conjuntos finitos, entonces

$$|A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n| = \alpha_1 - \alpha_2 + \alpha_3 - \dots + (-1)^{n-1} \alpha_n,$$

donde α_i es la suma de los cardinales de las intersecciones de los conjuntos tomados de a i por vez ($1 \leq i \leq n$).

Demostración. Debemos demostrar que cada elemento x de la unión hace una contribución neta de 1 al miembro de la derecha. Supongamos que x pertenece a k de los conjuntos A_1, A_2, \dots, A_n . Entonces x contribuye con k

en la suma $\alpha_1 = |A_1| + \cdots + |A_n|$. En la suma α_2 , x contribuye 1 en $|A_i \cap A_j|$ cuando A_i y A_j están entre los k conjuntos que contienen a x . Existen $\binom{k}{2}$ de esos pares, por lo tanto $\binom{k}{2}$ es la contribución de x a α_2 . En general la contribución de x a α_i ($1 \leq i \leq n$) es $\binom{k}{i}$. Por lo tanto el total con que contribuye x al lado derecho de la igualdad es

$$\binom{k}{1} - \binom{k}{2} + \cdots + (-1)^{k-1} \binom{k}{k},$$

porque los términos con $i > k$ dan cero.

Por el teorema del binomio aplicado a $(1-1)^k = 0$, se deduce que la expresión de arriba es igual a $\binom{k}{0}$, que vale 1. \square

Un corolario simple del teorema B.1.1 es a menudo más útil en la práctica. Supongamos que X es un conjunto finito y A_1, A_2, \dots, A_n son subconjuntos de X (cuya unión no necesariamente es igual a X). Si $|X| = N$, entonces el número de elementos de X que no están en ninguno de esos subconjuntos es

$$\begin{aligned} |X - (A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n)| &= |X| - |A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n| \\ &= N - \alpha_1 + \alpha_2 - \cdots + (-1)^n \alpha_n. \end{aligned}$$

Ejemplo. Hay 73 estudiantes en el primer año de la Escuela de Artes de la universidad. De ellos, 52 saben tocar el piano, 25 el violín y 20 la flauta; 17 pueden tocar tanto el piano como el violín, 12 el piano y la flauta; pero solo Juan Rictero puede tocar los tres instrumentos ¿Cuántos alumnos no saben tocar ninguno de esos instrumentos?

Solución. Con V , P y F denotaremos los conjuntos de estudiantes que saben tocar el violín, el piano y la flauta respectivamente. Usando la información dada tenemos que

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= |P| + |V| + |F| = 52 + 25 + 20 = 97 \\ \alpha_2 &= |P \cap V| + |V \cap F| + |P \cap F| = 17 + 7 + 12 = 36 \\ \alpha_3 &= |P \cap V \cap F| = 1. \end{aligned}$$

Por consiguiente, el número de estudiantes que o pertenecen a ninguno de los tres conjuntos P , V y F es

$$73 - 97 + 36 - 1 = 11.$$

\square

Ejemplo. Una secretaria ineficiente tiene n cartas distintas y n sobres con direcciones ¿De cuántas maneras puede ella arreglárselas para meter cada carta en un sobre equivocado? (Esto es comúnmente llamado el *problema del desarreglo* del cual hay varias formulaciones pintorescas.)

Solución. Podemos considerar cada carta y su correspondiente sobre como si estuvieran etiquetadas con un entero i en el rango $1 \leq i \leq n$. El acto de poner las cartas en los sobres puede describirse como una permutación π de \mathbb{N}_n : $\pi(i) = j$ si la carta i va en el sobre j . Necesitamos saber el número de *desarreglos*, esto es, las permutaciones π tales que $\pi(i) \neq i$ para todo i en \mathbb{N}_n .

Denotemos A_i ($1 \leq i \leq n$) el subconjunto de S_n (el conjunto de permutaciones de \mathbb{N}_n) que contiene aquellos π tales que $\pi(i) = i$. Diremos que los elementos de A_i *fijan* i . Por el principio del tamiz, el número de desarreglos es

$$d_n = n! - \alpha_1 + \alpha_2 - \cdots + (-1)^n \alpha_n,$$

donde α_r es la suma de los cardinales de las intersecciones de los A_i tomando r por vez. En otras palabras, α_r es el número de permutaciones que fijan r símbolos dados, tomando todas las maneras de elegir los r símbolos. Ahora hay $\binom{n}{r}$ maneras de elegir r símbolos, y el número de permutaciones que los fijan es solo el número de permutaciones de los restantes $n - r$ símbolos, que es $(n - r)!$. Por lo tanto

$$\alpha_r = \binom{n}{r} \cdot (n - r)! = \frac{n!}{r!}, \quad d_n = n! \left(1 - \frac{1}{1!} + \frac{1}{2!} - \cdots + (-1)^n \frac{1}{n!} \right).$$

□

§ Ejercicios

- 1) En una clase de 67 estudiantes de matemática, 47 leen francés, 35 leen alemán y 23 leen ambos lenguajes ¿Cuántos estudiantes no lee ninguno de los dos lenguajes? Si además 20 leen ruso, de los cuales 12 también leen francés, 11 leen alemán y 5 leen los tres lenguajes, ¿cuántos estudiantes no leen ninguno de los tres lenguajes?
- 2) Encontrar el número de formas de ordenar las letras A, E, M, O, U, Y en una secuencia de tal forma que las palabras ME e YOU no aparezcan.
- 3) Calcular el número d_4 de desarreglos de $\{1, 2, 3, 4\}$ y escriba, en la notación cíclica, las permutaciones relevantes.
- 4) Usar el principio de inducción para probar que la fórmula para d_n satisface la recursión

$$d_1 = 0, \quad d_2 = 1, \quad d_n = (n - 1)(d_{n-1} + d_{n-2}) \quad (n \geq 3).$$

- 5) Probar que el número de desarreglos de $\{1, 2, \dots, n\}$ en el cual un objeto dado (digamos el 1) está en un 2-ciclo es $(n - 1)d_{n-2}$. Utilizar

esto para dar una prueba directa de la fórmula recursiva del ejercicio anterior.

LA FUNCIÓN DE EULER

C.1 LA FUNCIÓN DE EULER

En esta sección probaremos un útil e importante teorema, usando sólo los conceptos de conteo más básicos.

El teorema se refiere a las propiedades de divisibilidad de los enteros. Recordemos que dos enteros x e y son *coprimos* si el $\text{mcd}(x, y) = 1$. Por cada $n \geq 1$ sea $\phi(n)$ el número de enteros x en el rango $1 \leq x \leq n$ tal que x y n son coprimos. Podemos calcular los primeros valores de $\phi(n)$ haciendo una tabla (tabla 2).

La función es llamada *función de Euler*, debido a Leonhard Euler (1707 – 1783). Cuando n es primo, digamos $n = p$, cada uno de los enteros $1, 2, \dots, p - 1$ es coprimo con p , entonces tenemos

$$\phi(p) = p - 1, \quad p \text{ primo.}$$

n	Coprimos a n	$\phi(n)$
1	1	1
2	1	1
3	1, 2	2
4	1, 3	2
5	1, 2, 3, 4	4
6	1, 5	2
7	1, 2, 3, 4, 5, 6	6
8	1, 3, 5, 7	4

Cuadro 2: Primeros valores de $\phi(n)$

Nuestra tarea ahora es probar un resultado respecto a la suma de los valores $\phi(d)$, donde los d son todos los divisores de un número positivo n dado. Por ejemplo, cuando $n = 12$, los divisores d son 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 12, podemos ver que

$$\begin{aligned}
 & \phi(1) + \phi(2) + \phi(3) + \phi(4) + \phi(6) + \phi(12) \\
 &= 1 + 1 + 2 + 2 + 2 + 4 \\
 &= 12.
 \end{aligned}$$

f	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\phi(d)$
d													
1	12												1
2	6												1
3	4	8											2
4	3		9										2
6	2				10								2
12	1				5	7					11		4
													12

Cuadro 3

Debemos demostrar que la suma es siempre igual al entero n dado.

Teorema C.1.1. *Para cualquier n entero positivo,*

$$\sum_{d|n} \phi(d) = n.$$

Demostración. Sea S el conjunto de pares de enteros (d, f) que satisfacen

$$d|n, \quad 1 \leq f \leq d, \quad \text{mcd}(f, d) = 1.$$

La tabla 3 muestra S cuando $n = 12$; la “marca” que indica que (d, f) pertenece a S es un número cuya importancia explicaremos en seguida. Por lo general, el número de “marcas” en la fila d es el número de f ’s en el rango $1 \leq f \leq d$ que satisfacen que el $\text{mcd}(d, f) = 1$; esto es $\phi(d)$. Por lo tanto, contando S por el método de las filas obtenemos

$$|S| = \sum_{d|n} \phi(d).$$

Para demostrar que $|S| = n$ debemos construir una biyección β de S en \mathbb{N}_n . Dado un par (d, f) en S , definimos

$$\beta(d, f) = fn/d.$$

En la tabla, $\beta(d, f)$ es la “marca” en la fila d y la columna f . Como $d|n$, el valor de β , es un entero y como $1 \leq f \leq d$, entonces $\beta(d, f)$ pertenece a \mathbb{N}_n .

Para probar que β es una inyección observemos que

$$\beta(d, f) = \beta(d', f') \Rightarrow fn/d = f'n/d' \Rightarrow fd' = f'd.$$

Pero f y d son coprimos, así como también lo son f' y d' , así que podemos concluir que $d = d'$ y $f = f'$.

Para demostrar que β es una suryección, supongamos que nos dan un x que pertenece a \mathbb{N}_n . Sea g_x el mcd de x y n , y sea

$$d_x = n/g_x, \quad f_x = x/g_x.$$

Puesto que g_x es un divisor de x y n , entonces d_x y f_x son enteros, y como g_x es el mcd, d_x y f_x son coprimos. Ahora

$$\beta(d_x, f_x) = f_x n / d_x = x,$$

y por lo tanto β es suryectiva. Luego β es biyectiva y $|S| = n$, como queríamos demostrar. \square

§ Ejercicios

- 1) Encontrar los valores de $\phi(19)$, $\phi(20)$, $\phi(21)$.
- 2) Probar que si x y n son coprimos, entonces lo son $n - x$ y n . Deducir que $\phi(n)$ es par para todo $n \geq 3$.
- 3) Probar que, si p es un primo y m es un entero positivo, entonces un entero x en el rango $1 \leq x \leq p^m$ no es coprimo a p^m si y solo si es un múltiplo de p . Deducir que $\phi(p^m) = p^m - p^{m-1}$.
- 4) Encontrar un contraejemplo que confirme que es falsa la conjetura $\phi(ab) = \phi(a)\phi(b)$, para enteros cualesquiera a y b . Trate de modificar la conjetura de tal forma que no pueda encontrar un contraejemplo.
- 5) Probar que para cualesquiera enteros positivos n y m se cumple:

$$\phi(n^m) = n^{m-1} \phi(n).$$

- 6) Calcular $\phi(1\,000)$ y $\phi(1\,001)$.

C.2 UNA APLICACIÓN ARITMÉTICA DEL PRINCIPIO DEL TAMIZ

Por cientos de años los matemáticos han estudiado problemas sobre números primos y la factorización de los enteros. Nuestra breve discusión sobre estos temas en los primeros capítulos debería haber convencido al lector de que estos problemas son difíciles, porque los primos mismos se encuentran irregularmente distribuidos, y porque no hay una forma directa de encontrar la factorización en primos de un entero dado. De todos modos, si se nos da la factorización en primos de un entero, es relativamente fácil responder ciertas preguntas sobre sus propiedades aritméticas. Supongamos,

por ejemplo que queremos listar todos los divisores de un entero n y sabemos que la factorización de n es

$$n = p_1^{e_1} p_2^{e_2} \cdots p_r^{e_r}.$$

Entonces un entero d es divisor de n si y solo si no tiene divisores primos distintos de los de n , y ningún primo divide más veces a d que a n . Visto así, los divisores son precisamente los enteros que pueden escribirse de la forma

$$d = p_1^{f_1} p_2^{f_2} \cdots p_r^{f_r},$$

donde cada f_i ($1 \leq i \leq r$) satisface $0 \leq f_i \leq e_i$. Por ejemplo dado que $60 = 2^2 \cdot 3 \cdot 5$ podemos listar rápidamente todos los divisores de 60.

Un problema similar es encontrar el número de enteros x en el rango $1 \leq x \leq n$ que son coprimos con n . En la sección C.1 denotamos este número con $\phi(n)$, el valor de la función ϕ de Euler en n . Ahora demostraremos que si la factorización en primos de n es conocida, entonces $\phi(n)$ puede ser calculado por el principio del tamiz.

Ejemplo. ¿Cuál es el valor de $\phi(60)$? En otras palabras, ¿cuántos enteros x en el rango $1 \leq x \leq 60$ satisfacen $\text{mcd}(x, 60) = 1$?

Solución. Sabemos que $60 = 2^2 \cdot 3 \cdot 5$, así que podemos contar el número de enteros x en el rango $1 \leq x \leq 60$ que no son divisibles por 2, 3 o 5. Con $A(2)$ denotemos el subconjunto de \mathbb{N}_{60} que contiene los enteros que son divisibles por 2, con $A(2, 3)$ aquellos que son divisibles por 2 y 3, y así sucesivamente, entonces tenemos

$$\begin{aligned} \phi(60) &= 60 - |A(2) \cup A(3) \cup A(5)| \\ &= 60 - |A(2) + A(3) + A(5)| \\ &\quad + (|A(2, 3) + A(2, 5)| + |A(3, 5)|) - |A(2, 3, 5)|, \end{aligned}$$

por el principio del tamiz. Ahora $|A(2)|$ es el número de múltiplos de 2 en \mathbb{N}_{60} que es $60/2 = 30$. Del mismo modo $|A(2, 3)|$ es el número de múltiplos de $2 \cdot 3$, que es $60/(2 \cdot 3) = 10$, y así siguiendo, por lo tanto

$$\phi(60) = 60 - (30 + 20 + 10) + (10 + 6 + 4) - 2 = 16.$$

□

El mismo método puede ser usado para dar una fórmula explícita para $\phi(n)$ en el caso general.

Teorema C.2.1. Sea $n \geq 2$ un entero cuya factorización es $n = p_1^{e_1} p_2^{e_2} \cdots p_r^{e_r}$. Entonces

$$\phi(n) = n \left(1 - \frac{1}{p_1}\right) \left(1 - \frac{1}{p_2}\right) \cdots \left(1 - \frac{1}{p_r}\right).$$

Demostración. Denotemos A_j el subconjunto de \mathbb{N}_n que contiene los múltiplos de p_j ($1 \leq j \leq r$). Entonces

$$\begin{aligned}\phi(n) &= n - |A_1 \cup A_2 \cup \cdots \cup A_r| \\ &= n - \alpha_1 + \alpha_2 - \cdots + (-1)^r \alpha_r\end{aligned}$$

donde α_i es la suma de los cardinales de las intersecciones de los conjuntos tomados de a i . Una intersección típica como

$$A_{j_1} \cup A_{j_2} \cup \cdots \cup A_{j_i}$$

contiene los múltiplos de $P = p_{j_1} \cdot p_{j_2} \cdots p_{j_i}$ en \mathbb{N}_n , y estos son los números

$$P, 2P, 3P, \dots, \left(\frac{n}{P}\right)P.$$

Luego la cardinalidad de una intersección típica es n/P , y α_i es la suma de términos como

$$\frac{n}{P} = n \left(\frac{1}{p_{j_1}}\right) \left(\frac{1}{p_{j_2}}\right) \cdots \left(\frac{1}{p_{j_i}}\right).$$

Se sigue que

$$\begin{aligned}\phi(n) &= n - n \left(\frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_2} + \cdots + \frac{1}{p_r}\right) + n \left(\frac{1}{p_1 p_2} + \frac{1}{p_1 p_3} + \cdots\right) + \cdots \\ &\quad \cdots + (-1)^r \left(\frac{1}{p_1 p_2 \cdots p_r}\right) = \\ &= n \left(1 - \frac{1}{p_1}\right) \left(1 - \frac{1}{p_2}\right) \cdots \left(1 - \frac{1}{p_r}\right).\end{aligned}$$

□

GRAFOS PLANARES

D.1 GRAFOS PLANARES

Usualmente el diagrama de un grafo se realiza en el plano por la comodidad que esto representa. Esto no significa que todo grafo sea lo que se denomina un *grafo planar*. ¿Qué es un grafo planar? Es un grafo tal que *existe* un diagrama del grafo en el plano tal que no hay ningún cruce de aristas. Por ejemplo, el grafo K_3 es claramente planar Fig. 23-(a). Claro que podríamos dibujar a K_3 como en la Fig. 23-(b) y no parecería planar.



Figura 23: Dibujos de K_3

Pero la definición es que un grafo es planar si se *puede* dibujar en el plano sin cruces de aristas, no si *todo* dibujo no tiene cruces. (Si la definición fuera así, ningún grafo sería planar, pues siempre se puede dibujar cualquier grafo con cruces). Otro ejemplo, ya visto, K_4 puede ser dibujado como en la Fig. 24-(a) y no parece planar, pero dibujado como en la Fig. 24-(b) muestra que K_4 es planar.



Figura 24: Dibujos de K_4

En vista de estos ejemplos, una pregunta es ¿existen grafos no planares? Por ejemplo si dibujáramos K_{16} parecería imposible que fuera planar, dada la gran cantidad de cortes, pero ¿cómo podemos estar seguros?

Observemos primero que si G es planar y H es subgrafo de G , entonces H es planar, pues, si podemos dibujar a G en el plano sin cortes de aristas, entonces H que esta “metido” en G , también puede ser así dibujado. Así, como ya vimos que K_4 es planar, sabemos que todo subgrafo de él es planar; es decir, todo grafo con cuatro o menos vértices es planar. Esta observación tiene consecuencias en la otra dirección también: si encontramos un grafo H que *no* sea planar, entonces todo grafo G que lo tenga como subgrafo deberá necesariamente ser no planar, pues si G fuera planar, H también lo sería. Así, si queremos probar que K_{16} no es planar, bastará con encontrar algún subgrafo mas sencillo de el que no lo sea. De hecho, probaremos que K_5 no es planar, con lo cual todos los grafos K_n , con $n \geq 5$ son no planares.

En lo que sigue veremos un arma poderosa para probar que un grafo es no planar: la llamada “fórmula de Euler”. Supongamos que un grafo *sí* es planar. Escojamos un diagrama de él en el plano (puede haber muchos, escojamos uno). Este diagrama divide al plano en varias regiones. Por ejemplo, si G esta representado por el dibujo de la Fig. 25, entonces se obtienen regiones que numeraremos como en la Fig. 26 (1 es la región “exterior” a todo el grafo).

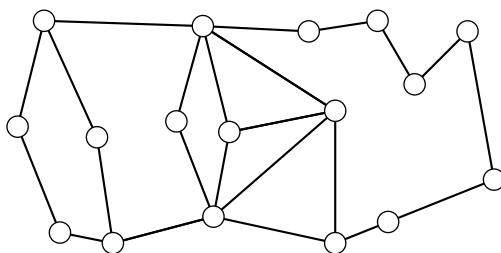


Figura 25: Un grafo planar

En realidad, también podríamos considerar a la región formada por las regiones 3 y 4 juntas, o 2, 5 y 6 juntas, etc. Pero nuestra preocupación estará centrada en una de estas regiones “simples”, a las cuales llamaremos *caras*.

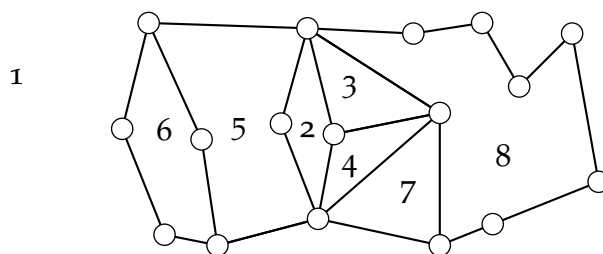


Figura 26: Regiones de un grafo planar

Observemos que no podemos hablar propiamente de las caras del grafo (aunque a veces lo haremos así) pues ellas son en realidad dependientes del diagrama, no del grafo. Sin embargo, algo puede decirse acerca de ellas:

Teorema D.1.1. (Fórmula de Euler) Sea G un grafo conexo, con v vértices, y e aristas. Supongamos que en algún diagrama planar de G , existen f caras. Entonces, $v - e + f = 2$.

Antes de ver la prueba, observemos que, puesto que v y e dependen de G y no del diagrama, la fórmula de Euler dice que no importa como dibujemos a G en el plano (siempre y cuando esto sea posible), entonces siempre obtendremos $e - v + 2$ caras. Por lo tanto, el número de caras es algo independiente del diagrama, y podemos hablar del “número de caras de un grafo planar”. Otra observación es que en el número de caras estamos contando la cara infinita, es decir, la exterior a todo el grafo. Finalmente, observemos que se pide que G sea conexo. La fórmula debe ser alterada en caso contrario.

Demostración del teorema D.1.1. Supongamos que la fórmula de Euler no sea cierta. Es decir, supongamos que existen grafos planares para los cuales la fórmula no es válida. Tomemos, de todos estos contraejemplos, alguno con e tan chico como sea posible, y llamemos G a ese grafo. Observemos que G debe tener por lo menos un ciclo, pues si fuera acíclico, como es conexo, sería un árbol. Ahora bien, en un árbol, $e = v - 1$. Además, por ser acíclico, no hay caras, salvo la cara infinita, es decir, f sería 1. Pero entonces $v - e + f = v - (v - 1) + 1 = v - v + 1 + 1 = 2$ y G no sería un contraejemplo. Así pues, G tiene al menos un ciclo. Sea xy alguna arista perteneciente a algún ciclo, y consideremos $H = G - xy$. Como xy pertenece a algún ciclo, es una arista que separa dos caras en G . Esas dos caras ahora son una sola en H . Ver Fig. 27.

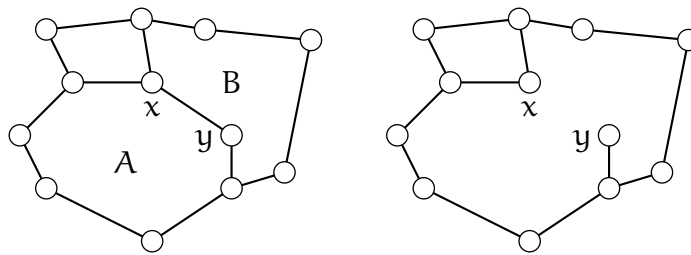


Figura 27: Eliminar una arista

Así, si f_H , e_H y v_H denotan el número de caras, aristas y vértices de H respectivamente, tenemos que $f_H = f - 1$. Además, como borramos una arista, $e_H = e - 1$, y como el número de vértices no cambia, $v_H = v$.

Pero, $e_H = e - 1$ es menor que e , y G era un contraejemplo con un número tan chico como fuera posible de aristas, por lo tanto, H no es un contraejemplo, es decir, $v_H - e_H + f_H = 2$. Reemplazando, obtenemos:

$$v - e + f = v_H - (e_H + 1) + f_H + 1 = v_H - e_H - 1 + f_H + 1 = v_H - e_H + f_H = 2,$$

lo cual dice que G no es un contraejemplo, absurdo. \square

La fórmula de Euler es una herramienta muy poderosa en la teoría de grafos planares. Para empezar, permite probar que un grafo planar no puede tener muchas aristas, en relación a sus vértices

Corolario D.1.2. *Sea G un grafo planar con al menos 3 vértices. Entonces, $e \leq 3v - 6$, donde e es el número de aristas y v el número de vértices de G .*

Demostración. Consideremos las caras de G . Si es una cara distinta de la cara infinita, es porque viene de un ciclo. Ahora bien, todo ciclo debe tener por lo menos 3 aristas, así que podemos concluir que hay por lo menos 3 aristas en el borde de esa cara. Si, en cambio, es la cara infinita y el grafo tiene más de tres aristas entonces “toca” 3 o más aristas. Si el grafo tiene menos de 3 aristas (y ningún ciclo), es uno de los de la Fig. 28. Como estamos suponiendo que hay al menos 3 vértices, en realidad solo hay que considerar el último caso, y ese tiene $e = 2$, $v = 3$, y $2 \leq 3 \cdot 3 - 6$.

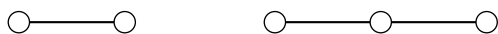


Figura 28: Grafos acíclicos con menos de 3 aristas

Así pues, podemos suponer que en nuestro grafo, todas las caras tienen al menos 3 aristas en su borde. Es decir:

$$\begin{aligned} 3 &\leq \text{Número de aristas en el borde de cara 1} \\ 3 &\leq \text{Número de aristas en el borde de cara 2} \\ &\vdots \\ 3 &\leq \text{Número de aristas en el borde de cara } f. \end{aligned}$$

Si sumamos estas desigualdades, del lado izquierdo obtendremos $3f$. En el lado derecho, cada arista puede, o bordear dos caras, o bordear una. Pero ciertamente, no puede haber aristas que sean borde de 3 caras. Así, si sumamos en el lado izquierdo, la suma nos dará menor o igual a $2e$. Por lo tanto, $3f \leq 2e$. Tomando la fórmula de Euler y multiplicándola por 3, obtenemos: $3v - 3e + 3f = 6$. Usando ahora $3f \leq 2e$, tenemos

$$6 = 3v - 3e + 3f \leq 3v - 3e + 2e = 3v - e,$$

es decir, $e \leq 3v - 6$. \square

Este corolario nos permite probar inmediatamente la no planaridad de un número significativo de grafos. Por ejemplo, recordemos que queríamos ver que K_5 era no planar. Esto lo obtenemos en forma directa, pues K_5 tiene 5 vértices y 10 aristas, por lo tanto, si fuera planar debíamos tener que $10 \leq 3 \cdot 5 - 6 = 15 - 6 = 9$, lo cual no es cierto.

D.2 EL PROBLEMA DEL AGUA-LUZ-GAS

Este es un conocido problema de escuela primaria: existen tres casas, y tres centrales: la del agua, la de la luz y la del gas. Trazar las cañerías desde las centrales a las casas sin que se crucen. Una solución (pero haciendo trampa) es mandar las tres cañerías a una casa, y de ella sacarlas las tres a la otra, y de ella las tres a la otra:

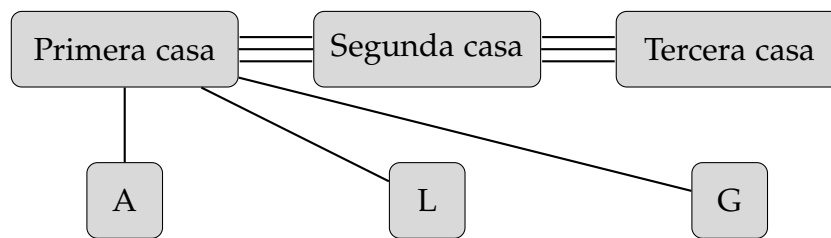
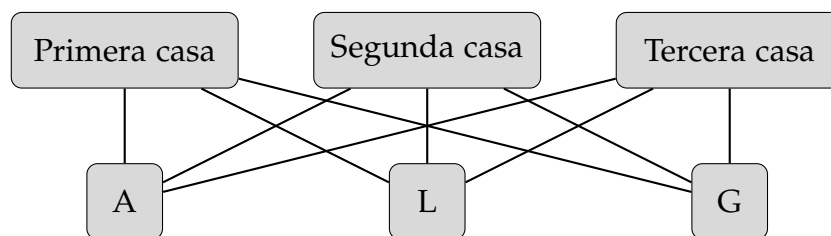


Figura 29: Una solución tramposa

En realidad, no permitiremos el uso de intermediarios, es decir el problema será llevar directamente la cañería desde cada central a cada casa. En el lenguaje de la teoría de grafos, consiste en representar, en el plano, al grafo $K_{3,3}$ Fig. 30.

Figura 30: Luz-agua-gas es $K_{3,3}$

La pregunta es entonces si $K_{3,3}$ es planar o no. Veamos si podemos usar esta fórmula que probamos recién: $K_{3,3}$ tiene 9 aristas, y 6 vértices. Desafortunadamente, $3 \cdot 6 - 6 = 18 - 6 = 12$ es ciertamente mayor que 9, así que solo sabemos que quizás es planar. Pero, observemos que $K_{3,3}$, por ser bipartito, no tiene ningún triángulo como subgrafo. Así pues, deduciremos la no planaridad de $K_{3,3}$ del siguiente

Corolario D.2.1. Si G es un grafo planar con por lo menos 3 vértices y que no tiene ningún triángulo como subgrafo, entonces $e \leq 2v - 4$.

Demostración. Es similar a la demostración del corolario D.1.2, pero como no hay triángulos, todo ciclo tiene por lo menos 4 aristas, es decir, cada cara

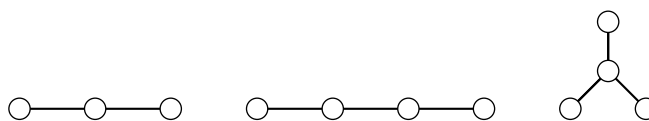


Figura 31: Grafos acíclicos con menos de 4 aristas y al menos 3 vértices

esta bordeada por al menos 4 aristas. Las únicas excepciones con al menos 3 vértices son los de la fig. 31

En el primer caso, $e = 2$, $v = 3$ y $2 \cdot 3 - 4 = 6 - 4 = 2$. En el segundo y terceros, $e = 3$, $v = 4$ y $2 \cdot 4 - 4 = 8 - 4 = 4 \geq 3$. Así pues, podemos suponer que cada cara esta bordeada por al menos 4 aristas. Sumando cara a cara, como antes, obtenemos ahora $4f \leq 2e$, es decir, $2f \leq e$. Multiplicando la fórmula de Euler por 2, tenemos: $4 = 2v - 2e + 2f \leq 2v - 2e + e = 2v - e$, es decir, $e \leq 2v - 4$. \square

Retornando a $K_{3,3}$, como no tiene triángulos, podemos aplicar este corolario, y si fuera planar, debería cumplirlo. Pero habíamos dicho que $K_{3,3}$ tiene 9 aristas y 6 vértices, y $2 \cdot 6 - 4 = 12 - 4 = 8$. Por lo tanto, $K_{3,3}$ no es planar.

Una ultima observación acerca de grafos planares: existe un teorema muy interesante, de difícil demostración (la prueba tiene 31 casos y subcasos para considerar) debido a Kuratowski, que dice que K_5 y $K_{3,3}$ son los dos grafos “básicos” no planares, en el siguiente sentido: un grafo G es no planar si y solo si existe un subgrafo de G , digamos H , tal que H se “ve” como K_5 o como $K_{3,3}$, es decir, H es uno de ellos, excepto que tal vez, “agregue” en alguna o algunas aristas, vértices en el medio. Por ejemplo, H puede lucir como en la fig. 32.

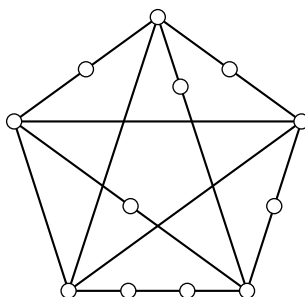


Figura 32: Un grafo no planar “básico”

D.3 EL TEOREMA DE LOS CUATRO COLORES

Juntaremos ahora lo que hemos visto en esta sección con lo que vimos en la anterior, para tratar uno de los problemas mas famosos y recalcitrantes

de la teoría de grafos, a saber: ¿cuántos colores se necesitan para colorear un grafo planar? En otras palabras, si quiero estar seguro de poder colorear propiamente los vértices de cualquier grafo planar, ¿cuántos colores necesito tener? De hecho, una pregunta más básica sería si existe una cantidad finita de colores que me permitan colorear cualquier tipo de grafo planar, por grande que sea. (Es claro que la respuesta para grafos en general es negativa, pues K_n requiere n colores.) Como K_4 es planar, sabemos que necesitamos por lo menos 4 colores. No podemos decir que necesitamos necesariamente 5, pues hemos visto que K_5 no es planar. Pero, podría haber otro grafo, complicado pero planar, que requiera 5, o más, colores. A mediados del siglo pasado la conjetura de que bastan 4 colores fue hecha, y en 1879 A. Kempe publicó una prueba de este hecho, que paso a llamarse el teorema de los cuatro colores. Desafortunadamente para Kempe, en 1889 (diez años después) otro matemático, P. Heawood, probó que la prueba de Kempe contenía un error. Heawood no fue completamente destructivo: mostró que adaptando la prueba de Kempe, podía probarse que con 5 colores bastaba para colorear cualquier grafo planar (el teorema de los cinco colores). Así pues, quedó planteado el problema de saber si el teorema de los cuatro colores era cierto, o bien si existía algún grafo planar para el cual 5 colores fueran necesarios. (Pero, al menos, gracias a Heawood, no era necesario buscar alguno que necesitara 6, o 7 u 8 colores, pues no existen, gracias al teorema de los cinco colores.) De hecho, en ese mismo artículo, Heawood probó más cosas: existe algo llamado género de un grafo, que es un número entero no negativo. Heawood demostró que existía una fórmula (expresión aritmética) que para cada género $g \geq 1$ da la cantidad de colores que permite colorear todos los grafos de género g . Los grafos planares tiene género igual a 0 y aplicando la fórmula para $g = 0$ obtenemos el número 4. Sin embargo, Heawood pudo probar que la fórmula es válida si g es mayor o igual a 1. El hecho de que esta fórmula existiera “convenció” a mucha gente de que el teorema de los cuatro colores debía ser cierto y que una prueba no tardaría en hallarse. Sin embargo, pese al esfuerzo de muchos matemáticos y pese al desarrollo de la teoría, el teorema de los cuatro colores no pudo probarse hasta 1975, cuando dos matemáticos norteamericanos, K. Appel y W. Haken, lo probaron. Más aún, no pudieron probarlos solos, sino que debieron usar la “ayuda” de un poderoso (para esa época) computador. Así, aún cuando el teorema fue probado, un gran sentimiento de desconfianza se generó, sobretudo en una época en la cual el acceso fácil a tiempo de computador no era común. Veinte años han pasado y la prueba ahora ha sido controlada numerosas veces y no genera tanta resistencia como antes. Aún así, si alguien pudiese publicar una prueba que fuese “leíble por humanos” sería muy bien bienvenido.

Obviamente por lo dicho arriba, no daremos una prueba del teorema de los cuatro colores. Sí daremos una del teorema de los cinco colores,

mencionando donde se encuentra la dificultad de la demostración del teorema de los cuatro colores, y dando una idea de que es lo que Appel y Haken (y el computador) hicieron.

Lema D.3.1. *Sea G un grafo planar. Entonces, existe un vértice de G de valencia 5 o menos.*

Demostración. Si el orden de G es menor o igual a 2, esto es obvio, pues la valencia de cualquier vértice no superará 2. Así, podemos suponer que hay al menos 3 vértices, y por lo tanto, sabemos que $e \leq 3v - 6$, donde e es el número de aristas y v el de vértices.

Supongamos ahora que la valencia de todos los vértices sea al menos 6. Entonces, si sumamos las valencias de todos los vértices, la suma será mayor o igual a $6v$. Pero la suma de todas las valencias es igual a $2e$ (lema del apretón de manos). Así, tenemos que $2e \geq 6v$. Por otro lado, como $e \leq 3v - 6$, tenemos que $2e \leq 6v - 12$, es decir, obtenemos $6v - 12 \geq 2e \geq 6v$, o $-12 \geq 0$, lo cual es un absurdo. \square

Teorema D.3.2. *(Teorema de los cinco colores) Si G es planar, $\chi(G) \leq 5$.*

Demostración. Supongamos que no sea cierto. De todos los contraejemplos al teorema, escojamos uno con la menor cantidad de vértices posible y llamémosle G . Por el lema anterior, existe un vértice x de G con valencia menor o igual a 5. Consideremos $H = G - \{x\}$, que es un grafo con menos vértices que G y por lo tanto no puede ser un contraejemplo; es decir, $\chi(H) \leq 5$. Así, podemos colorear H con 5 colores. Si la valencia de x en G es 0, 1, 2, 3 o 4, los vértices adyacentes a x “usan” a lo sumo 4 de los 5 colores, así que podemos colorear a x con el quinto color, y tendríamos que $\chi(G) = 5$, lo cual no es posible pues G es un contraejemplo. Así pues, podemos suponer que la valencia de x es 5. Ahora bien, si los cinco vértices adyacentes a x no usan cinco colores, estamos como antes, y podemos colorear a x con el color faltante. Así, no solo podemos suponer que hay cinco vértices adyacentes a x , sino también que cada uno está coloreado con un color distinto. Llamemos a estos vértices y, z, u, w, t , y supongamos que y es de color 1, z de color 2, etc.

Supongamos primero que no haya, entre y y u , ningún camino tal que el color de todos sus vértices sea 1 o 3. Entonces, podemos cambiarle el color a y , de color 1 a color 3. Además, a los vértices adyacentes a y que tengan color 3, les cambiamos el color de 3 a 1. A los vértices adyacentes a estos, que tengan color 1, los cambiamos a 3, y así sucesivamente. Después de realizar todos estos cambios, todavía tenemos un coloreo propio. Ahora bien, como estamos suponiendo que no hay ningún camino de color 1 y 3 exclusivamente entre y y u , resulta que u no cambia de color, es decir,

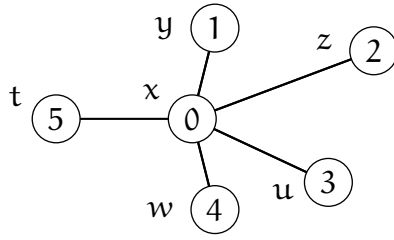


Figura 33: x es un vértice de valencia 5 en el grafo planar.

retiene el color 3. Pero y ahora tiene también el color 3, y ningún otro vértice adyacente a x tiene el color 1. Pero, entonces, podemos colorear a x con el color 1 sin problemas, absurdo pues $\chi(G) \geq 6$.

Así pues, existe un camino con todos los vértices de color 1 y 3 entre y y u . Igualmente, si no hubiera ningún camino con todos los vértices de color 2 y 4 entre z y w , le podemos cambiar el color a z de 2 a 4 sin problemas, y colorear a x con el color 2. Así, también podemos suponer que existe un camino con todos los vértices de color 2 y 4 entre z y w .

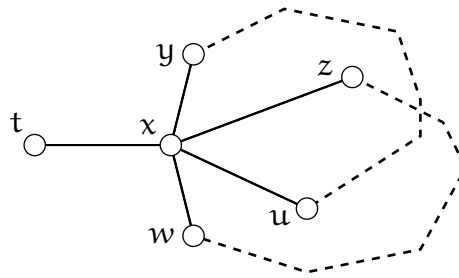


Figura 34: Caminos de y a u y de z a w

Por la Fig. 34 es claro que tenemos un problema: ¿por donde se cruzan los caminos A y B? Más precisamente, el camino A, junto con las aristas xy y xu , forma un ciclo C. Este ciclo tiene un interior y un exterior. El ciclo D formado por B y las aristas xz , xw cruza al ciclo C en el punto x , pues la arista xz está en el interior y la arista xw en el exterior de C. Por lo tanto, D debe cruzar a C en algún otro punto. Pero no puede hacerlo, pues en el resto, C está coloreado con los colores 1 y 3, y D con los colores 2 y 4. Hemos llegado a una contradicción. \square

Analicemos un poco la prueba: hemos probado dos cosas. La primera es que todo grafo planar debe tener una de las siguientes “configuraciones”, es decir, parte de él debe lucir como alguno de los grafos de la Fig. 35.

Esto lo probamos con el lema D.3.1. Es decir, probamos que ese conjunto de configuraciones es lo que se llama *inevitable*.



Figura 35: Posibles configuraciones

Además, en segunda instancia, probamos que si un grafo planar tiene una de esas configuraciones, puede ser coloreado con 5 colores (esto es lo que hicimos en el teorema). Es decir, probamos que ese conjunto de configuraciones es lo que se llama *irreducible* (para 5 colores).

Kempe creyó que había sido capaz de probar que todo grafo planar que tuviera esas configuraciones podía ser coloreado con 4 colores, y muchos autores después de Heawood trataron de probar lo mismo. Pero luego se descubrieron nuevas técnicas, tanto para probar que un conjunto de configuraciones es irreducible, como para probar que es inevitable. Lo que no se podía hacer era encontrar un conjunto que fuera al mismo tiempo irreducible (para 4 colores) e inevitable. Finalmente, Appel y Haken encontraron un conjunto que satisfacía esas propiedades. Solo que en vez de tener 6 elementos, como en el caso del teorema de 5 colores, el conjunto de Appel y Haken tiene 1 480 elementos, y ningún ser humano es capaz de probarlo, sino que es necesario un computador para comprobar la inevitabilidad e irreducibilidad.

El problema con la prueba de Appel y Haken es que se basa en programas de computadora y entonces uno debe confiar en que no hay errores de programación. Incluso algunos matemáticos han dicho que la prueba contiene varios errores, pero no han podido mostrarlos fehacientemente.

En cierta manera esta polémica se diluyó en el año 2005 cuando Benjamin Werner y Georges Gonthier formalizaron una prueba del teorema con el asistente de pruebas Coq. Esto eliminó la necesidad de confiar en los diversos programas informáticos utilizados para verificar casos particulares; solo es necesario confiar en el kernel de Coq, construido alrededor de un núcleo bien delimitado, el cual la comunidad científica considera que no debe tener errores. A esta altura está claro que esta prueba es mucho más confiable que la demostración de muchos teoremas importantes de la matemática de cientos de páginas propensos a errores humanos.

La prueba con Coq se encuentra en el artículo de G. Gonthier “Formal Proof—The Four-Color Theorem”, *Notices of the American Mathematical Society*, 55 (11): 1382–1393, MR 2463991 (2008).

Parte IV

ÍNDICE

ÍNDICE ALFABÉTICO

- algoritmo de Euclides, 56
- algoritmo greedy (goloso), 119
- altura de un árbol con raíz, 125
- aristas de un grafo, 97
- axioma del buen orden, 11

- base (de un sistema de numeración), 47

- caminata, 106
- caminata euleriana, 109
- camino, 106
- caras de un grafo planar, 154
- cardinal de un conjunto, 25
- ciclo, 106
- ciclo hamiltoniano, 109
- clases de equivalencia, 107
- codificar, 83
- coeficiente binomial, 35
- coloración de vértices, 118
- complemento de un grafo, 105
- componente de un grafo, 107
- congruencia, 71
- coprimos, 53
- cota inferior, 11
- cota superior, 13
- criptografía asimétrica, 83
- criptografía de clave pública, 83
- criptografía simétrica, 83

- divide, 49
- divisor, 49

- Ecuación lineal de congruencia, 76
- encriptar, 83
- Euler, Leonhard, 147
- expresión binómica, 41

- función de Euler, 82

- función de pesos, 130
- fórmula de Euler, 154

- grafo, 97
- grafo bipartito, 121
- grafo completo, 99
- grafo con pesos, 130
- grafo conexo, 107
- grafo cíclico, 104
- grafo de Petersen, 103
- grafo planar, 153
- grafo regular, 104
- grafos isomorfos, 101
- género de un grafo, 159

- Hamilton, W. R., 109
- handshaking lemma, 104
- hijo de un vértice, 126
- hipótesis inductiva, 18
- hoja, 125

- isomorfismo de grafos, 101

- lista de adyacencia, 99
- longitud de un ciclo, 106

- minimum spanning tree, 130
- MST, 130
- máximo común divisor, 51
- mínimo, 11
- mínimo común múltiplo, 60
- módulo m , 71
- múltiplo, 49

- niveles de un árbol, 125
- notación cíclica, 139
- número combinatorio, 35
- número cromático, 118
- número primo, 62

- padre de un vértice, 126
- permutación, 32
- permutación cíclica, 141
- principio de buena ordenación, 11
- principio de inclusion y exclusion, 143
- principio de inducción, 17
- principio de inducción completa, 20
- principio del tamiz, 143
- producto cartesiano, 26
- raíz, 125
- redes, 97
- regla del nueve, 74
- relación de equivalencia, 72, 107
- representación pictórica (de un grafo), 97
- RSA, 83
- selección ordenada sin repetición, 137
- Teorema de Fermat, 81
- Teorema de Kuratowski, 158
- Teorema de los cinco colores, 159
- Teorema de los cuatro colores, 159
- Teorema del binomio, 39
- valencia de un vértice, 103
- vértice impar, 103
- vértice interno, 125
- vértice par, 103
- vértices adyacentes, 99
- vértices de un grafo, 97
- árbol, 113
- árbol binario, 126
- árbol con raíz, 125
- árbol de decisión, 127
- árbol expandido, 129
- árbol expandido mínimo, 130
- árbol ternario, 126