

Modelos de Computación y Complejidad

Grado en Ingeniería Informática. Tecnologías Informáticas

PRELIMINARES

David Orellana Martín
Mario de J. Pérez Jiménez

Dpto. Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial
E.T.S. Ingeniería Informática
Universidad de Sevilla

dorellana@us.es (<http://www.cs.us.es/~dorellana/>)
marper@us.es (<http://www.cs.us.es/~marper/>)

Curso 2021-2022

Teoría de Zermelo-Fraenkel

Teoría intuitiva de conjuntos: G. Cantor (desarrollada entre 1873 y 1896).

Aparición de paradojas en la teoría de Cantor:

- * C. Burali-Forti (1897): afectaba al conjunto de los ordinales.
- * B. Russell (1901): afectaba a la relación de pertenencia.

Para resolver este escollo, algunos matemáticos optaron por la axiomatización.

- * E. Zermelo (1908): Primer sistema de axiomas de la teoría de conjuntos.
- * A. Fraenkel (1922): Complementa y “precisa” el sistema axiomático de Zermelo (en esa tarea, Th. Skolem realizó importantes contribuciones).

Teoría de Zermelo-Fraenkel

Los objetos matemáticos de esta teoría son **conjuntos**.

Conceptos primitivos o indefinibles en la teoría:

- * Concepto de **conjunto**.
- * Concepto de **pertenencia** ($a \in b$: el conjunto a es un elemento del conjunto b).

Sean a y b conjuntos. Notaremos $a \notin b$ para indicar que a **no es un elemento** de b

Fórmula $\theta(x)$ sobre un conjunto a :

- Si $b \in a$, entonces $\theta(b)$ es una proposición (verdadera o falsa).
- $\{x \mid \theta(x)\}$: conjunto cuyos elementos son los conjuntos x tales que la proposición $\theta(x)$ es verdadera.

Abreviaremos la expresión “**si y sólo si**” escribiendo “**sii**”.

Teoría de Zermelo-Fraenkel

Algunos axiomas de la teoría de Z-F que destacamos:

Axioma de extensionalidad: dos conjuntos a y b son iguales ($a = b$) **sii** poseen los mismos elementos: $\forall x (x \in a \longleftrightarrow x \in b)$.

Si los conjuntos a y b **no son iguales** entonces se notará $a \neq b$.

Axioma del conjunto vacío: existe un conjunto que carece de elementos (se denotará por $\emptyset$ y se denomina **conjunto vacío**),

Axioma del par no ordenado: para cada par de conjuntos a y b existe un conjunto c cuyos únicos elementos son a y b . Se notará $c = \{a, b\}$

- ★ El **par ordenado**, de primera componente el conjunto a y segunda componente el conjunto b , notaremos (a, b) , es el conjunto $\{\{a\}, \{a, b\}\}$.
- ★ Dados los conjuntos a, b, c y d se tiene que $(a, b) = (c, d)$ **sii** $a = c$ y $b = d$.

Teoría de Zermelo-Fraenkel

Axioma de la unión: dado un conjunto a , existe un conjunto (que se notará $\bigcup a$) cuyos elementos son, exactamente, los elementos de los conjuntos que son elementos de a . Es decir, $\bigcup a = \{x \mid \exists y (y \in a \wedge x \in y)\}$.
En el caso particular $a = \{b, c\}$, el conjunto $\bigcup a$ se notará $b \cup c$. Por tanto, se verificará que $b \cup c = \{x \mid x \in b \vee x \in c\}$.

Axioma del conjunto de partes: para cada conjunto a existe un conjunto $\mathcal{P}(a)$ cuyos elementos son todos los subconjuntos de a .

- ★ Se dice que un conjunto b es un **subconjunto** de a (y se notará $b \subseteq a$) si se verifica que $\forall x (x \in b \rightarrow x \in a)$.
- ★ Se dice que un conjunto b es un **subconjunto estricto** (o propio) de a (y se notará $b \subsetneq a$) si se verifica que $b \subseteq a$ y $b \neq a$.

Axioma del infinito: existe un conjunto $\mathbb{N}$ (denominado **conjunto de los números naturales**) tal que: (a) $\emptyset \in \mathbb{N}$; y (b) $\forall x (x \in \mathbb{N} \rightarrow x \cup \{x\} \in \mathbb{N})$.

El conjunto de los números naturales

Existencia del **conjunto de los números naturales** (axioma del infinito).

$$\mathbb{N} = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, \dots\}$$

El conjunto $\mathbb{N}$ se puede describir, de **manera recursiva**, como sigue:

- ★ 0 es el conjunto vacío.
- ★ Para cada número natural n se tiene que $n + 1 = n \cup \{n\}$.

Es decir:

- ★ $0 \stackrel{\text{def}}{=} \emptyset$.
- ★ $1 \stackrel{\text{def}}{=} 0 \cup \{0\} = \{0\}$.
- ★ $2 \stackrel{\text{def}}{=} 1 \cup \{1\} = \{0, 1\}$.
- ★ $3 \stackrel{\text{def}}{=} 2 \cup \{2\} = \{0, 1, 2\}$.
- ★

Qué son los números naturales

Los números naturales son los siguientes

- ★ 0 es el conjunto vacío.
- ★ Para cada número natural $n \neq 0$ se tiene que:
 - * n es un conjunto.
 - * n es un conjunto que consta, exactamente, de n elementos.
 - * n es el conjunto cuyos elementos son, exactamente: $0, 1, \dots, n-1$; es decir: $n = \{0, 1, \dots, n-1\}$.

Tuplas ordenadas

Par ordenado (a, b) : también se denomina 2-tupla ordenada.

A partir de aquí, se define, **manera recursiva**, las n -tuplas ordenadas, para cada $n \geq 3$, como sigue:

$$\star (x_1, x_2, x_3) \stackrel{\text{def}}{=} (x_1, (x_2, x_3)).$$

$$\star (x_1, x_2, x_3, x_4) \stackrel{\text{def}}{=} (x_1, (x_2, x_3, x_4)).$$

$$\star (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \stackrel{\text{def}}{=} (x_1, (x_2, x_3, x_4, x_5)).$$

$$\star \dots\dots\dots$$

En general: $(x_1, x_2, \dots, x_n) \stackrel{\text{def}}{=} (x_1, (x_2, \dots, x_n))$, para cada $n \geq 3$.

Así se tiene el concepto de n -tupla ordenada $(x_1, \dots, x_n)$, para cada $n \geq 2$.

Operaciones con conjuntos

Sean a y b dos conjuntos arbitrarios:

★ **Unión:** $a \cup b = \{x \mid x \in a \vee x \in b\}$

★ **Intersección:** $a \cap b = \{x \mid x \in a \wedge x \in b\}$

* Dos conjuntos a y b se dicen que son **disjuntos** sii $a \cap b = \emptyset$.

★ **Diferencia:** $a \setminus b = \{x \mid x \in a \wedge x \notin b\}$

★ **Complementario:** Si $b \subseteq a$, el complementario de b en a es $a \setminus b$.

★ **Conjunto de las partes** de a : $\mathcal{P}(a) = \{x \mid x \subseteq a\}$.

★ **Producto cartesiano** de a y b (¡en ese orden!):

$$a \times b = \{(x_1, x_2) \mid x_1 \in A \wedge x_2 \in B\}$$

Para cada número natural $n \geq 2$, si $a_1, \dots, a_n$ son conjuntos entonces se define $a_1 \times \dots \times a_n = \{(x_1, \dots, x_n) : x_1 \in a_1 \wedge \dots \wedge x_n \in a_n\}$.

Se define $a^1 = a$ y $a^n = a \times \overset{(n)}{\dots} \times a$, para cada número natural $n \geq 2$.

Funciones

- ★ Una **función** f es un conjunto de **pares ordenados**, tal que

$$\forall x \forall y \forall z ((x, y) \in f \wedge (x, z) \in f \implies y = z)$$

- ★ Una **función** f es **inyectiva** si satisface la siguiente condición:

$$\forall x \forall y \forall z ((x, y) \in f \wedge (z, y) \in f \implies x = z)$$

- ★ El **dominio** de una función f es el conjunto:

$$\text{dom}(f) = \{x \mid \exists y ((x, y) \in f)\}$$

- ★ El **rango** de f es el conjunto:

$$\text{rang}(f) = \{y \mid \exists x ((x, y) \in f)\}$$

- ★ Si f es una función y $a \in \text{dom}(f)$, entonces existe un único $b \in \text{rang}(f)$ tal que $(a, b) \in f$. Notaremos $f(a) = b$ para expresar que $(a, b) \in f$.

- ★ Si $x \in \text{dom}(f)$, notaremos $f(x) \downarrow$ (f está definida en x).

- ★ Si $x \notin \text{dom}(f)$, notaremos $f(x) \uparrow$ (f no está definida en x).

- ★ $[f = g] \iff [\text{dom}(f) = \text{dom}(g) \wedge \forall x \in \text{dom}(f) (f(x) = g(x))]$.

Tipos de funciones

Sean A y B dos conjuntos.

- ★ Una **función total** f de A en B (notaremos $f : A \longrightarrow B$) es una función que verifica: $\text{dom}(f) = A$ y $\text{rang}(f) \subseteq B$.
 - Una **aplicación** f de A en B es una función total f de A en B .
- ★ Una **función parcial** f de A en B (notaremos $f : A \dashrightarrow B$) es una función que verifica: $\text{dom}(f) \subseteq A$ y $\text{rang}(f) \subseteq B$.
 - Toda función total de A en B es una función parcial de A en B .
 - Existen funciones parciales de A en B que no son funciones totales de A en B (por ejemplo: la función f de $\mathbb{N}$ en $\mathbb{N}$ definida por $f(x) = \text{raíz cuadrada de } x$. Se tiene que $f(10) \uparrow$).
- ★ Una función parcial f de A en B es:
 - **sobreyectiva** (o suprayectiva) si $\text{rang}(f) = B$.
 - **biyectiva** si es total, inyectiva y sobreyectiva.

Si A un conjunto, la **función identidad** sobre A es la función $\text{Id}_A : A \rightarrow A$, definida por $\text{Id}_A(x) = x$.

Composición de funciones

Sean $f : A \rightarrow B$ y $g : B \rightarrow C$. La **composición** de f y g (¡en ese orden!) es la función parcial h de A en C definida así:

$$h = \{(x, y) \in A \times C : \exists z \in B (f(x) = z \wedge g(z) = y)\}$$

Gráficamente,

$$\begin{array}{ccccc} A & \xrightarrow{f} & B & \xrightarrow{g} & C \\ x & \mapsto & f(x) & \mapsto & g(f(x)) \quad (= h(x)) \end{array}$$

Notación: $h = g \circ f$.

Función inversa

Si f es una **función** entonces se define el **conjunto** $f^{-1} = \{(x, y) \mid (y, x) \in f\}$.

- ★ El conjunto f^{-1} **no tiene por qué** ser una función.
- ★ f^{-1} es una función **sii** f es inyectiva (**función inversa** de f). Además, en este caso se tiene que $(f^{-1})^{-1} = f$.

Proposición: Sea f una función total de A en B .

- f^{-1} es una aplicación de B en A **sii** f es biyectiva.
- Si f es biyectiva, entonces $f \circ f^{-1} = Id_B$ y $f^{-1} \circ f = Id_A$.

Imagen directa e imagen inversa por una función

Sea f una función parcial de un conjunto A en un conjunto B .

- ★ Si $C \subseteq A$ entonces la **imagen directa** de C por f es el conjunto $f[C] = \{y \in B \mid \text{Existe } x \in \text{dom}(f) \cap C \text{ tal que } f(x) = y\}$
- ★ Si $D \subseteq B$ entonces la **imagen inversa** de D por f es el conjunto $f^{-1}[D] = \{x \in A \mid x \in \text{dom}(f) \text{ y } f(x) \in D\}$

Familia de conjuntos

Sea I un conjunto no vacío.

- ★ Una **familia de conjuntos, con conjunto de índices I** , es una función F cuyo dominio es I (los elementos de I se denominan **índices** de la familia).
 - * La familia F se representará así: $\{F(i) \mid i \in I\}$.
 - * Si $I = \{1, \dots, n\}$, con $n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$, entonces la familia F se representará así: $\{F(1), \dots, F(n)\}$.
- ★ Sea F una familia de conjuntos, con conjunto de índices I .
 - * La **unión** de los conjuntos de la familia F , que se notará $\bigcup_{i \in I} F(i)$, es el conjunto $\{x \mid \exists i (i \in I \wedge x \in F(i))\}$.
 - * La **intersección** de los conjuntos de la familia F , que se notará $\bigcap_{i \in I} F(i)$, es el conjunto $\{x \mid \forall i (i \in I \rightarrow x \in F(i))\}$.

Familia de conjuntos

Sea F una familia de conjuntos, con conjunto de índices $I \neq \emptyset$.

- ★ Se dice que F es una **familia de conjuntos disjuntos dos a dos** si satisface la siguiente propiedad:
 - * Para cada $i, j \in I$ tales que $i \neq j$, se tiene que los conjuntos $F(i)$ y $F(j)$ de la familia, son disjuntos.
- ★ Se dice que F es un **recubrimiento de un conjunto A** si satisface la siguiente propiedad: $A \subseteq \bigcup_{i \in I} F(i)$.
- ★ Se dice que F es una **partición de un conjunto A** si satisface:
 - * F es una familia de subconjuntos de A .
 - * F es un recubrimiento de A .
 - * F es una familia de conjuntos disjuntos dos a dos.

Sucesiones de elementos de un conjunto

Sucesión finita de elementos de un conjunto A : es una aplicación de un número natural $n \in \mathbb{N}$ en el conjunto A .

- ★ El número natural n se denomina **longitud** de la sucesión.
- ★ La sucesión finita de longitud 0 será la función vacía.
- ★ Una sucesión finita, f , de longitud $n + 1$ se representará así:
 $f(0) f(1) \dots f(n)$.

Toda sucesión finita de elementos de un conjunto A , de longitud $n \in \mathbb{N}$, es una familia de conjuntos (que son elementos de A), cuyo conjunto de índice es n .

Sucesión infinita de elementos de un conjunto A : es una aplicación del conjunto $\mathbb{N}$ de los números naturales en el conjunto A .

- ★ Una sucesión infinita, f , se representará así: $f(0) f(1) \dots$

Toda sucesión infinita de elementos de un conjunto A es una familia de conjuntos (que son elementos de A), cuyo conjunto de índice es $\mathbb{N}$.

Conjuntos infinitos

Un conjunto A es **infinito** **sii** existe un subconjunto estricto B de A tal que es **equipotente** a A (es decir, existe una aplicación biyectiva de B en A).

- ★ El conjunto $\mathbb{N}$ es infinito: existe una biyección entre dicho conjunto y el subconjunto de los números pares.

Un conjunto A es **numerable** **sii** existe una aplicación biyectiva de $\mathbb{N}$ en A .

Ejemplos:

- ★ El conjunto $\mathbb{N}^2$ es numerable: se prueba que la función $J : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{N}$ definida por $J(x, y) = \frac{(x+y)(x+y+1)}{2} + x$ es **biyectiva**.
- ★ Para cada $k \geq 2$, el conjunto $\mathbb{N}^k$ es numerable.
- ★ El conjunto $\mathbb{Q}$ de los números racionales es numerable.
- ★ El conjunto $\mathbb{R}$ de los números reales **no** es numerable.
- ★ El intervalo $[0, 1) \subseteq \mathbb{R}$ **no** es numerable.
- ★ $\mathcal{P}(\mathbb{N})$ **no** es numerable.

Método diagonal de Cantor: $\mathcal{P}(\mathbb{N})$ no es numerable

Caso contrario, $\mathcal{P}(\mathbb{N}) = \{A_0, A_1, A_2, \dots, A_n, \dots\}$.

- ★ Cada subconjunto B de $\mathbb{N}$ se puede identificar con una sucesión infinita compuesta de SÍES y NOES:

	0	1	2	...	n	...
B	SÍ	NO	NO	...	SÍ	...

En la posición j -ésima aparece SÍ cuando $j \in B$ y NO en caso contrario.

- ★ Formemos una tabla infinita con la información de los conjuntos A_j (de acuerdo con el criterio anterior).

	0	1	2	..	n	..
A_0	SÍ	no	no	..	no	..
A_1	no	NO	sí	..	sí	..
A_2	sí	sí	NO	..	no	..
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
A_n	no	sí	no	..	SÍ	..
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

- ★ El conjunto $D \subseteq \mathbb{N}$ definido como sigue a través de la diagonal de la tabla (permutando SÍ y NO, entre sí)

	0	1	2	...	n	...
D	NO	—	—	...	—	...
	—	SÍ	—	...	—	...
	—	—	SÍ	...	—	...
	—	—	—	...	—	...
	—	—	—	...	NO	...
	—	—	—	...	—	...

Entonces $D \in \mathcal{P}(\mathbb{N})$ y D es un conjunto distinto de $A_0, A_1, A_2, \dots, A_n, \dots$. Lo que es una **contradicción**.

Método diagonal de Cantor: $[0, 1)$ no es numerable

Recuérdese que $[0, 1) = \{x \in \mathbb{R} : 0 \leq x < 1\}$

Veamos ahora que

- ★ Cada número real $x \in [0, 1)$ se puede escribir en base 10 como: $0.a_0 a_1 a_2 \dots$, en donde cada $a_k \in \{0, 1, 2, \dots, 9\}$. Por tanto podemos identificar x con la sucesión $(a_0, a_1, a_2, \dots, a_n, \dots)$
- ★ Si el conjunto $[0, 1)$ fuese numerable, entonces $[0, 1) = \{x_0, x_1, x_2, \dots\}$. Ahora bien, cada x_j tendría una expresión decimal: $0.a_{j,0} a_{j,1} a_{j,2} \dots$
- ★ Formemos una tabla infinita con las expresiones decimales de los x_j :

x_0	$a_{0,0}$	$a_{0,1}$	$a_{0,2}$	$\dots$	$a_{0,n}$	$\dots$
x_1	$a_{1,0}$	$a_{1,1}$	$a_{1,2}$	$\dots$	$a_{1,n}$	$\dots$
x_2	$a_{2,0}$	$a_{2,1}$	$a_{2,2}$	$\dots$	$a_{2,n}$	$\dots$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\dots$	$\vdots$	$\dots$
x_n	$a_{n,0}$	$a_{n,1}$	$a_{n,2}$	$\dots$	$a_{n,n}$	$\dots$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\dots$	$\vdots$	$\dots$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\dots$	$\vdots$	$\dots$

- ★ Definamos ahora el número real $d = 0.d_0 d_1 d_2 \dots, d_n \dots$, en donde $d_j = \begin{cases} 0 & \text{si } a_{j,j} \neq 0 \\ 1 & \text{si } a_{j,j} = 0 \end{cases}$
- ★ Entonces $d \in [0, 1)$ y para todo $j \in \mathbb{N}$, $x_j \neq d$; es decir, $d \notin \{x_0, x_1, x_2, \dots\} = [0, 1)$. Lo que es una **contradicción**.

Predicados

Sea A un conjunto. Si $(x_1, \dots, x_n) \in A^n$, $n \neq 0$, entonces notaremos $\vec{x} \in A^n$.

Un **predicado** n -ario, $n \neq 0$, θ sobre A es una aplicación de A^n en $\{0, 1\}$.

- ★ Si $\theta(\vec{x}) = 1$ para $\vec{x} \in A^n$, diremos que el predicado θ se verifica para $\vec{x}$.
Caso contrario, diremos que el predicado θ no se verifica para $\vec{x}$.
- ★ Todo predicado n -ario, θ , sobre A determina un subconjunto de A^n definido así: $S_\theta = \{\vec{x} \in A^n \mid \theta(\vec{x}) = 1\}$.
- ★ Todo subconjunto de $B \subseteq A^n$ determina un predicado n -ario θ_B sobre A tal que $\theta_B(\vec{x}) = 1$ **sii** $\vec{x} \in B$.

La **función característica** de $B \subseteq A^n$ es el siguiente predicado sobre A^n :

$$C_B(\vec{x}) = \begin{cases} 1 & \text{si } \vec{x} \in B \\ 0 & \text{si } \vec{x} \in A^n \setminus B \end{cases}$$

La función característica del subconjunto B es el predicado n -ario asociado a B .

Operaciones con predicados

Sean θ y θ' predicados n -arios, $n \neq 0$, sobre un conjunto A . Se definen los siguientes predicados n -arios sobre A :

- ★ $(\neg\theta)(\vec{x}) = 1 - \theta(\vec{x})$. Se notará $\neg\theta(\vec{x})$ en lugar de $(\neg\theta)(\vec{x})$
- ★ $(\theta \vee \theta')(\vec{x}) = \max \{\theta(\vec{x}), \theta'(\vec{x})\}$. Se notará $\theta(\vec{x}) \vee \theta'(\vec{x})$ en lugar de $(\theta \vee \theta')(\vec{x})$.
- ★ $(\theta \wedge \theta')(\vec{x}) = \min \{\theta(\vec{x}), \theta'(\vec{x})\}$. Se notará $\theta(\vec{x}) \wedge \theta'(\vec{x})$ en lugar de $(\theta \wedge \theta')(\vec{x})$.
- ★ $\theta \rightarrow \theta' \stackrel{\text{def}}{=} (\neg\theta) \vee \theta'$.
- ★ $\theta \leftrightarrow \theta' \stackrel{\text{def}}{=} (\theta \rightarrow \theta') \wedge (\theta' \rightarrow \theta)$.

Se verifican las siguientes relaciones:

- ★ $S_{\theta \vee \theta'} = S_{\theta} \cup S_{\theta'}$.
- ★ $S_{\theta \wedge \theta'} = S_{\theta} \cap S_{\theta'}$.
- ★ $S_{\neg\theta} = A^n \setminus S_{\theta}$.

Cuantificación **acotada**

Sea $\theta(x_1, \dots, x_n, y)$ un predicado $(n+1)$ -ario sobre $\mathbb{N}$.

- ★ El predicado obtenido a partir de θ por **cuantificación existencial acotada** es el siguiente predicado $(n+1)$ -ario sobre $\mathbb{N}$:

$$(\exists z)_{\leq y} \theta(\vec{x}, z) = \begin{cases} 1 & \text{si existe } z_0 \leq y \text{ tal que } \theta(\vec{x}, z_0) = 1. \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Obsérvese que $(\exists z)_{\leq y} \theta(\vec{x}, z) = \theta(\vec{x}, 0) \vee \theta(\vec{x}, 1) \vee \dots \vee \theta(\vec{x}, y)$.

- ★ El predicado obtenido a partir de θ por **cuantificación universal acotada** es el siguiente predicado $(n+1)$ -ario sobre $\mathbb{N}$:

$$(\forall z)_{\leq y} \theta(\vec{x}, z) = \begin{cases} 1 & \text{si para todo } z_0 \leq y \text{ se tiene } \theta(\vec{x}, z_0) = 1. \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Obsérvese que $(\forall z)_{\leq y} \theta(\vec{x}, z) = \theta(\vec{x}, 0) \wedge \theta(\vec{x}, 1) \wedge \dots \wedge \theta(\vec{x}, y)$.

Cuantificación **no acotada**

Sea $\theta(x_1, \dots, x_n, y)$ un predicado $(n+1)$ -ario sobre $\mathbb{N}$, con $n \neq 0$.

- ★ El predicado obtenido a partir de θ por **cuantificación existencial no acotada** es el siguiente predicado n -ario sobre $\mathbb{N}$:

$$(\exists z) \theta(\vec{x}, z) = \begin{cases} 1 & \text{si existe } z_0 \text{ tal que se verifica } \theta(\vec{x}, z_0) = 1. \\ 0 & \text{en caso contrario.} \end{cases}$$

- ★ El predicado obtenido a partir de θ por **cuantificación universal no acotada** es el siguiente predicado n -ario sobre $\mathbb{N}$:

$$(\forall z) \theta(\vec{x}, z) = \begin{cases} 1 & \text{si para todo } z_0 \text{ se verifica } \theta(\vec{x}, z_0) = 1. \\ 0 & \text{en caso contrario.} \end{cases}$$

El principio de minimización

Expresión sobre predicados. Sea $\theta(x)$ un predicado 1-ario sobre $\mathbb{N}$. Si $\exists x \theta(x)$ entonces $\exists m (\theta(m) \wedge \forall y < m (\neg \theta(y)))$

★ Notación: $m = \mu x (\theta(x))$ (m es el **mínimo** de los x que verifican $\theta(x)$).

Expresión conjuntista. Sea $A \subseteq \mathbb{N}$ tal que $A \neq \emptyset$. Entonces $\exists m (m \in A \wedge \forall y < m (y \notin A))$

★ Notación: $m = \min(A)$ (m es el **menor elemento** de A).

Ejercicio.

★ Probar que todo número natural $n \geq 2$ es divisible por un número primo.

Indicación: considérese el conjunto $A = \{x \mid x > 1 \wedge x \text{ divide a } n\}$, pruébese que es no vacío y justifíquese que el menor elemento de ese conjunto es un número primo.

El principio de inducción débil

Teorema: Sea $\theta(x)$ un predicado 1-ario sobre $\mathbb{N}$ tal que se verifica $\theta(0)$ y $\forall x (\theta(x) \longrightarrow \theta(x+1))$. Entonces se tiene que $\forall x \theta(x)$.

Corolario: Sean $\theta(x)$ un predicado 1-ario sobre $\mathbb{N}$ y $a \in \mathbb{N}$ tales que se verifica $\theta(a)$ y $\forall x \geq a (\theta(x) \longrightarrow \theta(x+1))$. Entonces se tiene que $\forall x \geq a (\theta(x))$.

Ejercicios.

★ Probar que para cada $n \in \mathbb{N}$ se tiene que $\sum_{i=0}^n i = \frac{n(n+1)}{2}$

★ Probar que para cada $n \in \mathbb{N}$ se tiene que $\sum_{i=0}^n (2i+1) = (n+1)^2$

El principio de inducción fuerte

Teorema: Sea $\theta(x)$ un predicado 1-ario sobre $\mathbb{N}$ tal que se verifica $\theta(0)$ y $\forall x ([\forall p \leq x \theta(p)] \longrightarrow \theta(x+1))$. Entonces se tiene que $\forall x \theta(x)$.

Corolario: Sean $\theta(x)$ un predicado 1-ario sobre $\mathbb{N}$ y $a \in \mathbb{N}$ tales que se verifica $\theta(a)$ y $\forall x \geq a ([\forall p \geq a (p \leq x \longrightarrow \theta(p))] \longrightarrow \theta(x+1))$. Entonces $\forall x \geq a (\theta(x))$.

Ejercicio.

- ★ Probar que todo número natural $n \geq 2$ se puede descomponer en un producto de números primos.

Lenguajes formales

- ★ **Alfabeto**: conjunto no vacío (*símbolos*).
- ★ **Cadena** o palabra sobre un alfabeto Γ : sucesión finita de símbolos de Γ .
- ★ **Longitud de una cadena** u : número de símbolos que contiene ($|u|$).
- ★ **Concatenación** de cadenas sobre un alfabeto Γ : composición de cadenas.
- ★ La **cadena vacía** consta de 0 símbolos y se suele notar por λ .
- ★ Γ^* : conjunto de todas las cadenas sobre Γ .
- ★ $\Gamma^+ : \Gamma^* - \{\lambda\}$.
- ★ Γ^n = conjunto de cadenas sobre Γ de longitud n .
- ★ **Lenguaje formal** sobre un alfabeto Γ : un subconjunto de Γ^* .