

1 First week

2^A : insieme delle parti di $A \Rightarrow 2^{\#A} =$ elenco delle parti di A

Relazioni: dati 2 insiemi X e Y , e un sottoinsieme $\mathcal{R}(X,Y)$ è detto relazione tra X e Y e scriveremo $x\mathcal{R}y, x,y \in \mathcal{R}$

Funzione: siano dati X,Y e dia f una relazione tra X e Y , $f \subset X \times Y$. diremo che f è una funzione da X in Y se vale:

$$\forall x \in X : \exists! y \in Y t.c. (x,y) \in f$$

Dominio: insieme delle x che vanno in Y

Codomidio: insieme delle y che hanno corrispondenza in X

Legge: proprietà che definisce una relazione da X a Y

Insieme di tutte le funzioni: Y^X corrisponde a tutte le funzioni con leggi diverse ma con stessi insiemi di partenza ed arrivo

Funzione identità: $id_X(X) = X$

Composizione di funzioni: $x \rightarrow^f y \rightarrow^g z \Rightarrow g(f(x)) = z \Rightarrow gof(x) = z$

Iniettiva: ad ogni $f(x)$ corrisponde un solo y

Surgettiva: ad ogni y corrisponde un $f(x)$

Bigiettiva: sia iniettiva che suriettiva

Inversa: se f è biettiva, allora esiste $g = f^{-1}$

2 Second week

Sistemi equipotenti: X e Y sono equipotenti ($X \sim Y$) se hanno la stessa cardinalità e la funzione $f : X \rightarrow Y$ è bigiettiva (o invertibile)

insiemi cardinali: sono gli insiemi in formato $\{0,1,\dots,n\}$ equipotenti all'insieme dato, si rappresentano $|A|$ e definiscono una cardinalità pari a $n+1$

TEOREMA: X e Y sono equipotenti se e solo se i loro insiemi cardinali sono uguali

$$|X| = |Y|$$

Numeri naturali: sono definiti dagli assiomi di Peano:

- 0 è un numero naturale
- esiste una funzione successivo $\mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$
- $\text{succ}(n) \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$, cioè il successivo di ogni naturale è diverso da 0
- vale principio d'induzione

Principio d'induzione: con $A \subset \mathbb{N}$

- base induttiva: $0 \in A$
- passo induttivo: $\forall n \in \mathbb{N}, n \in A \Rightarrow \text{succ}(n) \in A$, allora $A = \mathbb{N}$

Principio induttivo di prima forma:

Prendiamo una proposizione $P(n)$ e supponiamo che rispetti 2 condizioni:

- la base induttiva: $P(0)$ è vera
- il passo induttivo: $\forall n \in \mathbb{N}$, $P(n)$ è vera (ipotesi induttiva), allora $P(\text{succ}(n))$

Se rispetta queste condizioni allora implica $\forall n \in \mathbb{N}$, $P(n)$

Teorema di ricorsione: Sia X un insieme, esiste una funzione $f : \mathbb{N} \rightarrow X$ t.c.:

$$\begin{aligned} f(0) &= c \\ f(\text{succ}(n)) &= h(n, f(n)) \end{aligned}$$

Addizione: tramite il teorema di ricorsione definiamo la funzione $m \rightarrow n + m$:

$$\begin{aligned} n + 0 &= n \\ n + \text{succ}(m) &= \text{succ}(n + m) \end{aligned}$$

Moltiplicazione: tramite il teorema di ricorsione definiamo la funzione $m \rightarrow nm$:

$$\begin{aligned} n \cdot 0 &= 0 \\ n(m + 1) &= nm + n \end{aligned}$$

Ordinamento dei naturali: può essere totale o parziale

Ordine parziale: è una relazione $\mathcal{R} \subset X \times X$ e rispetta le seguenti proprietà:

- riflessiva: $x\mathcal{R}x, \forall x \in X$
- antisimmetrica: $x\mathcal{R}y \wedge y\mathcal{R}x \Rightarrow x = y, \forall x, y \in X$
- transitiva: $x\mathcal{R}y \wedge y\mathcal{R}z \Rightarrow x\mathcal{R}z, \forall x, y, z \in X$

Ordinamento totale: come l'ordinamento parziale, ma con la proprietà aggiunta:

- tricotomia: $x\mathcal{R}y \vee y\mathcal{R}x \vee x \neq y \wedge y \neq x, \forall x, y \in X$

insiemi ordinati: se \mathcal{R} è parziale o totale, dirò che (X, \mathcal{R}) è parzialmente o totalmente ordinato

Principio d'induzione shiftato di prima forma: identico alla prima forma ma la base invece che 0, parte da $k \leq n$

- base induttiva: $P(k)$ è vera
- passo induttivo: $\forall n \geq k$, $P(n)$ è vera $\Rightarrow P(n+1)$

3 third week

exercises

4 forth week

Insiemi finiti: Indicando con I_n un insieme che va da 0 a n , diremo che l'insieme X è finito se esiste $n \in \mathbb{N}$ t.c. $I_n \sim X$. Se non esiste lo definiremo insieme infinito.

Teorema di lemma dei cassetti: Siano X e Y due insiemi rispettivamente $X \sim I_n$ e $Y \sim I_m$ con $n < m$ allora la funzione $f(x) : Y \rightarrow X$ non è iniettiva

Cardinalità: Sia X un insieme finito. Definiamo cardinalità n t.c. I_n sia equipotente a X . Definiamo I_n come insieme cardinalità associato a X

Proposizione: Sia A insieme finito e $B \subseteq A$, allora $|B| \leq |A|$

Osservazione: Qualsiasi $f(x) : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}/\{0\}$ è bigettiva

Minimo: Sia A un insieme e $z \in A$. Se $\forall x \in A, z \leq x$, allora definiremo z come **minimo** di A :

$$z = \min(A)$$

Buon ordinamento: Un ordinamento totale è definito **ben ordinato** se ogni sottoinsieme di (Z, \leq) ammette un minimo

Assioma di buon ordinamento: L'ordinamento (\mathbb{N}, \leq) è ben ordinato e l'ordinamento \leq è **usuale** su \mathbb{N} (cioè se $\exists k$ t.c. $n + k = m$ allora $n \leq m$)

Principio di induzione (2^a forma): prendiamo una famiglia di proposizioni $P(n)$ e supponiamo rispetti le 2 condizioni:

- la base induttiva: $P(0)$ è vera
- il passo induttivo: $\forall n \in \mathbb{N}, \forall k \in \mathbb{N}$ t.c. $0 \leq k \leq n$, $P(k)$ è vera (ipotesi induttiva), allora $P(n)$

Se rispetta questa condizioni allora implica $\forall n \in \mathbb{N}, P(n)$

Divisione euclidea: Siano $n, m \in \mathbb{Z}$. $m \neq 0 \Rightarrow \exists! q, r \in \mathbb{Z}$:

$$\begin{aligned} n &= mq + r \\ 0 &\leq r < |m| \end{aligned}$$

(si definiscono q quoziente e r resto della divisione di n per m)

5 fifth week

Rappresentabilità: Sia $b \in \mathbb{N}$, diremo che $n \in \mathbb{N}$ è rappresentabile in base b se esistono $k \in \mathbb{N}$ e $\varepsilon_0, \varepsilon_1, \dots, \varepsilon_k \in I_b$ t.c.:

$$n = \sum_{i=0}^k \varepsilon_i b^i \quad \text{con } I_b = \{0, 1, \dots, b-1\}$$

Teorema della rappresentazione dei naturali in base arbitraria: Sia $b \in \mathbb{N}, b \geq 2$, allora $\forall n \in \mathbb{N}$, n è rappresentabile in base b in maniera univoca

Divisibilità: Dati $n, m \in \mathbb{Z}$ si dice che n è **divisore** di m (o m è multiplo di n) se $\exists k \in \mathbb{Z}$ t.c. $m = nk$ e scriveremo $n|m$

Proprietà della divisibilità:

- se $n|m$ e $m|q$ allora $n|q$
- se $n|m$ e $m|n$ allora $n = \pm m$

Massimo Comune Divisore: Dati $m, n \in \mathbb{Z}$ si dice $d \in \mathbb{Z}, d > 0$ massimo comune divisore se:

- $d|n$ e $d|m$
- $\exists c \in \mathbb{Z}$ t.c. $c|n$ $c|m$ $c|d$

proposizione: se d e d^I sono mcd tra m e n allora $d = d^I$

Teorema: dati $n, m \in \mathbb{Z} \neq 0$, esiste mcd unico indicato con (n, m)

Lemma utile: dati $n, m, c \in \mathbb{Z} \neq 0$ e $c|n$ $c|m$, allora $\forall x, y \in \mathbb{Z}$ vale:

$$c|xn + ym$$

Corollario: Siano $n, m \in \mathbb{Z} \neq 0$ se sia $d := (n, m)$ allora esistono $x, y \in \mathbb{Z}$ t.c.:

$$d = xn + ym$$

Numeri coprimi: dati $n, m \in \mathbb{Z}$, si dicono coprimi fra di loro se $(n, m) = 1$

proposizione: sia $d = (n, m)$ allora $(\frac{n}{d}, \frac{m}{d}) = 1$

Algoritmo di Euclide:

$$\begin{array}{ll}
 n = q_1 m + r_1 & r_1 = n - q_1 m \\
 m = q_2 r_1 + r_2 & r_2 = m - q_2 r_1 \\
 r_1 = q_3 r_2 + r_3 & r_3 = r_1 - q_3 r_2 \\
 \cdot & \cdot \\
 \cdot & \cdot \\
 \cdot & \cdot \\
 r_{k-3} = q_{k-1} r_{k-2} + r_{k-1} & r_{k-1} = r_{k-3} - q_{k-1} r_{k-2} \\
 r_{k-2} = q_k r_{k-1} + r_k & r_k = r_{k-2} - q_k r_{k-1} \\
 r_{k-1} = q_{k+1} r_k + 0 & = xn + ym
 \end{array}
 \Rightarrow$$

Es:

$$(48, 28)$$

$$48 = 28 \cdot 1 + 20$$

$$28 = 20 \cdot 1 + 8$$

$$4 = 20 - 2 \cdot 8$$

$$20 = 8 \cdot 2 + 4 \quad \Rightarrow \quad 8 = 28 - 20 \cdot 1$$

$$8 = \underline{4} \cdot 2 + 0$$

$$20 = 48 - 28 \cdot 1$$

$$MDC = 4$$

\Downarrow

$$4 = 20 - 2(28 - 20 \cdot 1) = 3 \cdot 20 - 2 \cdot 28$$

$$4 = 3(48 - 28 \cdot 1) - 2 \cdot 28$$

$$= \underline{3 \cdot 48 - 5 \cdot 28}$$

6 Sixth week

Proprietà dei coprimi: Siano $n, m, q \in \mathbb{Z}$ e n o $m \neq 0$ e $(n, m) = 1$:

- Se $n|mq$ allora $n|q$
- Se $n|q$ e $m|q$ allora $nm|q$

Numeri primi: $p \in \mathbb{Z}$ si dice **primo** se $p \geq 2$ e i suoi divisori sono quelli banali ($\pm 1|p$, $\pm p|p$). p è primo se $\forall n, m$ e $p|nm$ allora $p|n \vee p|m$

Minimo Comune Multiplo: dati $n, m \in \mathbb{Z}$ si dice M minimo comune multiplo di n e m se:

- $n|M$ e $m|M$
- $\exists c$ t.c. $n|c, m|c, M|c$

Unicità mcm: dati $n, m \in \mathbb{Z}$ e M, M^1 sono mcm di n e m , allora $M = M^1$

Denotazione mcm: mcm di n e m si scrive $[n, m]$

Teorema d'esistenza: siano $n, m \in \mathbb{Z}$ allora $\exists [n, m]$ e se $n \vee m \neq 0$ allora:

$$[n, m] = \frac{nm}{(n, m)}$$

Teorema fondamentale dell'aritmetica: $\forall n \in \mathbb{N}, n \geq 2$, n è uguale a un prodotto di numeri primi, anche ripetuti:

$$n = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot \dots \cdot p_k$$

La fattorizzazione di questo prodotto è univoca

Corollario: i numeri primi sono infiniti

Congruenza: dati $a, b \in \mathbb{Z}$ diremo che a è congruo a b modulo n ($a \equiv b \pmod{n}$) se

$$n|a - b$$

Proprietà congruenza:

- riflessiva: $a \equiv a \pmod{n} \quad \forall a, n \in \mathbb{Z}$
- simmetrica: $a \equiv b \pmod{n}$ allora $b \equiv a \pmod{n} \quad \forall a, b, n \in \mathbb{Z}$
- transitiva: $a \equiv b \pmod{n}$ e $b \equiv c \pmod{n}$ allora $a \equiv c \pmod{n} \quad \forall a, b, c, n \in \mathbb{Z}$

equivalenza: una relazione \mathcal{R} binaria su l'insieme X si dice relazione d'equivalenza su X se:

- è riflessiva: $\forall x \in X, x\mathcal{R}x$
- è simmetrica: $\forall x, y \in X, x\mathcal{R}y$ allora $y\mathcal{R}x$
- è transitiva: $\forall x, y, z \in X, x\mathcal{R}y$ e $y\mathcal{R}z$ allora $x\mathcal{R}z$

7 seventh week

Classi d'equivalenza: sia X , $x \in X$ e \sim una relazione d'equivalenza su X . Chiameremo classe d'equivalenza di x in X rispetto a \sim il sottoinsieme di X i quali elementi y sono equivalenti a x :

$$[x]_{\sim} = \{y \in X \mid y \sim x\}$$

Insieme quoziente: chiameremo insieme quoziente di X modulo \sim l'insieme delle classi d'equivalenza contenute in X :

$$X/\sim = \{[x]_{\sim} \mid x \in X\}$$

Proprietà classi d'equivalenza:

- $\forall x \in X, x \in [x]$
- $\forall x, y \in X, [x] = [y] \Leftrightarrow x \sim y$
- $\forall x, y \in X, [x] \cap [y] \neq \emptyset \Rightarrow [x] = [y]$

Classi di congruenza: Dati $a, n \in \mathbb{Z}$ definiamo la classe di congruenza di a modulo n l'insieme delle x congruenti ad $a \bmod n$:

$$[a]_n = \{x \in \mathbb{Z} \mid x \equiv a \bmod n\}$$

Indicheremo l'insieme quoziente $\mathbb{Z} \bmod \sim_n$ come $\mathbb{Z}/_n\mathbb{Z}$ e ha come elementi le classi di congruenza $[a]_n$ che appartengono alle partizioni di \mathbb{Z} ($2^{\mathbb{Z}}$), quindi:

$$[a]_n = \{a + kn \mid k \in \mathbb{Z}\}$$

Es:

$$\mathbb{Z}/_3\mathbb{Z} = \{[0]_3, [1]_3, [2]_3\}$$

Prop: Sia $a \in \mathbb{Z}$ e sia r il resto di $\frac{a}{n}$, allora $a \equiv r \pmod{n}$, oppure:

$$[a]_n = [r]_n$$

Criterio di divisibilità: dati $a, n \in \mathbb{Z}$ con $n \neq 0$, diremo che a è multiplo di n se:

$$[a]_n = [0]_n$$

Notazione: dato $a \in \mathbb{Z}$ e $x \in [a]_n$ ($[a]_n = [x]_n$), diremo che x è **rappresentante della classe** $[a]_n$.
Se x è di tipo resto, allora x è **rappresentante canonico**

gli elementi di $\mathbb{Z}/_n\mathbb{Z}$ si chiamano **classi di resto** modulo n

Struttura algebrica: esistono due operazioni di somma e moltiplicazione tra insiemi quozienti:

- Somma: $[a]_n + [b]_n = [a + b]_n$
- Moltiplicazione: $[a]_n \cdot [b]_n = [a \cdot b]_n$

Prop: dati $a, a^I, b, b^I \in \mathbb{Z}$ tc $[a]_n = [a^I]_n$ e $[b]_n = [b^I]_n$ allora:

- Somma: $[a + b]_n = [a^I + b^I]_n$
- Moltiplicazione: $[a \cdot b]_n = [a^I \cdot b^I]_n$

Oss: Sia $a \in \mathbb{Z}$, $m \in \mathbb{N}$, $m > 0$. Allora:

$$[a]_n^m = [a_1]_n \cdot [a_2]_n \cdot \dots \cdot [a_m]_n = [a^m]_n$$

8 eight week

Teorema cinese del resto: Siano $n, m > 0$ e siano $a, b \in \mathbb{Z}$. Consideriamo il seguente sistema di congruenze:

$$\begin{cases} x \in \mathbb{Z} \\ x \equiv a \pmod{n} \\ x \equiv b \pmod{m} \end{cases} \quad \text{o} \quad \begin{cases} x \in \mathbb{Z} \\ [x]_n = [a]_n \\ [x]_m = [b]_m \end{cases}$$

Sia S l'insieme delle soluzioni dei precedenti Sistemi

$$S = \langle x \in \mathbb{Z} | x \equiv a \pmod{n} \text{ e } x \equiv b \pmod{m} \rangle$$

Il precedente sistema è **compatibile** (ammette soluzioni) se e soltanto se:

$$(n, m) | a - b$$

Se $S \neq \emptyset$ e $c \in S$, allora $S = [c]_{[n,m]} \in \mathbb{Z} = \langle c + k_{[n,m]} \in \mathbb{Z} | k \in \mathbb{Z} \rangle$

Es:

$$\begin{cases} x \equiv 9 \pmod{162} \\ x \equiv -9 \pmod{114} \end{cases}$$

1 - Compatibilità

$$\begin{aligned} (162, 114) = 6 & \Rightarrow (162, 114) | 9 - (-9) = 6 | 18 = 3 \\ & \Rightarrow 9 - (-9) = 3(162, 114)_{(1)} \end{aligned}$$

2 - Calcolo di una soluzione

Algoritmo di Euclide:

$$\begin{array}{l|l} 162 = 114 + 48 & 48 = 162 - 114 \\ 114 = 2 \cdot 48 + 18 & 18 = 114 - 2 \cdot 48 \\ 48 = 2 \cdot 18 + 12 & 12 = 48 - 2 \cdot 18 \\ 18 = 12 + 6 & 6 = 18 - 12 \\ 12 = 2 \cdot 6 + 0 & \end{array} \Rightarrow \begin{aligned} &= 18 - (48 - 2 \cdot 18) = 3 \cdot 18 - 48 \\ &= 3(114 - 2 \cdot 48) - 48 = 3 \cdot 114 - 7 \cdot 48 \\ &= 3 \cdot 114 - 7(162 - 114) = 10 \cdot 114 - 7 \cdot 162 \\ &6 = 10 \cdot 114 - 7 \cdot 162 \\ (162, 114) &= 10 \cdot 114 - 7 \cdot 162_{(2)} \end{aligned}$$

Da (1) e (2) segue che

$$\begin{aligned}9 - (-9) &= 3(162, 114) = 3(10 \cdot 114 - 7 \cdot 162) \\9 - (-9) &= 30 \cdot 114 - 21 \cdot 162_{(3)}\end{aligned}$$

$$9 + 21 \cdot 162 = -9 + 30 \cdot 114 \Rightarrow 3411$$

$c = 3411$ è una soluzione del sistema

3 - Calcolo di S

Teorema cinese del resto:

$$\begin{aligned}S &= [c]_{[162, 114]} = [3411]_{[162, 114]} \\[162, 114] &= \frac{162 \cdot 114}{(162, 114)} = 3078 \Rightarrow S = [3411]_{[3078]} = [333]_{[3078]} \\&\Rightarrow S = \langle 333 + 3078k \in \mathbb{Z} | k \in \mathbb{Z} \rangle\end{aligned}$$

Bonus:

Esiste soluzione di S divisibile da 17?

metodo 1

$$\begin{cases} x \equiv 333 \pmod{3078} \\ x \equiv 0 \pmod{17} \end{cases}$$
$$(3078, 17) | 333 - 0$$
$$1 | 333$$

è divisibile quindi accetta soluzione

metodo 2

$$\begin{aligned}[333 + 3078k]_{17} &= [333]_{17} + [3078]_{17}[k]_{17} \\[10]_{17} + [1]_{17}[k]_{17} &= [10 + k]_{17} \\&\Rightarrow k = 7\end{aligned}$$

9 ninth week

Elementi invertibili modulo n: Siano $a, n \in \mathbb{Z}$ con $n > 0$. Diremo che a è invertibile modulo n o equivalentemente che $[a]_n$ è invertibile in $\mathbb{Z}/_n\mathbb{Z}$ se esiste $x \in \mathbb{Z}$ tale che:

$$ax \equiv 1 \pmod{n} \Leftrightarrow [a]_n[x]_n = [1]_n$$

In questo caso diremo che x è un'inversa di $a \pmod{n}$ e $[x]_n$ è una classe inversa di $[a]_n$ in $\mathbb{Z}/_n\mathbb{Z}$

Lemma: Supponiamo che a sia invertibile modulo n , ovvero $[a]_n$ sia invertibile in $\mathbb{Z}/_n\mathbb{Z}$. Allora esiste un unico $[x]_n \in \mathbb{Z}/_n\mathbb{Z}$ tale che:

$$[a]_n[x]_n = [x]_n[a]_n = [1]_n$$

Equivalentemente $[x]_n$ è l'unica classe inversa di $[a]_n$ in $\mathbb{Z}/_n\mathbb{Z}$. Tale classe $[x]_n$ viene detta inversa e viene indicata con il simbolo $[a]_n^{-1}$

Prop: $a \in \mathbb{Z}$ è invertibile $\pmod{n} \Leftrightarrow (a, n) = 1$, in questo caso esiste $x, y \in \mathbb{Z}$ tali che:

$$xa + yn = 1$$

(*Algoritmo di euclide*)

Allora

$$[a]_n^{-1} = [x]_n$$

Es:

11 *inv*($\pmod{30}$)

$$(11, 30) = 1 \Rightarrow \exists [11]_{30}^{-1}$$

alg. euclide:

$$1 = 11 \cdot 11 + (-4)30$$

$$[1]_{30} = [(11)(11) + (-4)(30)] = [11]_{30}[11]_{30} + [-4]_{30}[0]_{30} = \underline{[11]_{30}}[11]_{30} \Rightarrow [11]_{30}^{-1} = [11]_{30}$$

Def: Dato $n \in \mathbb{Z}, n > 0$, indichiamo con $(\mathbb{Z}/_n\mathbb{Z})^*$ il sottoinsieme di $\mathbb{Z}/_n\mathbb{Z}$ formato da tutti gli interi modulo n invertibili

Prop: Sia p numero primo, allora vale:

$$(\mathbb{Z}/_p\mathbb{Z})^* = \{[1]_p, [2]_p, \dots, [p-1]_p\} = \mathbb{Z}/_p\mathbb{Z} \setminus \{[0]_p\}$$

inverti
cioè
mcd è
uguale
a 1

Prop: Sia $a \in \mathbb{Z}$ e r sia il resto di a/n , allora:

$$a \equiv r \pmod{n}$$

oppure

$$[a]_n = [r]_n$$

Criterio di divisibilità: dati $a, n \in \mathbb{Z}$ con $n \neq 0$, diremo che a è multiplo di n se:

$$[a]_n = [0]_n$$

notazione: dato $a \in \mathbb{Z}$ e $x \in [a]_n$ ($[a]_n = [x]_n$), diremo che x è *rappresentante della classe* $[a]_n$. Se x è di tipo resto, allora x è *rappresentante canonico*

Gli elementi di $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ si chiamano *classi di resto modulo n*

Struttura algebrica: Esistono due operazioni di somma e moltiplicazione tra insiemi quozienti:

Somma: $[a]_n + [b]_n = [a + b]_n$

Moltiplicazione: $[a]_n \cdot [b]_n = [ab]_n$

Prop: dati $a, a^I, b, b^I \in \mathbb{Z}$ tali che $[a]_n = [a^I]_n$ e $[b]_n = [b^I]_n$, allora:

- $[a + b]_n = [a^I + b^I]_n$
- $[ab]_n = [a^I b^I]_n$

Oss: Sia $a \in \mathbb{Z}$, $m \in \mathbb{N}$, $m > 0$. Allora:

$$[a]_n^m = [a^m]_n$$

10 tenth week

Il teorema di Fermat-Eulero

Definiamo la funzione $\phi : \mathbb{N}/\{0\} \rightarrow \mathbb{N}$, detta *funzione phi di eulero*, ponendo:

$$\phi(n) := |\{a \in \mathbb{Z} \mid 1 \leq a \leq n, (a, n) = 1\}| \quad \forall n \in \mathbb{N}/\{0\}$$

Oss: la funzione ϕ è moltiplicativa sulle coppie coprime:

$$\phi(n \cdot m) = \phi(n) \cdot \phi(m) \quad \forall n, m \in \mathbb{N}/\{0\} \text{ t.c. } (n, m) = 1$$

Sia p un numero primo e sia $m \in \mathbb{N}/\{0\}$. Considero $n = p^m$, allora $\phi(n) = \phi(p^m)$ che vale:

$$\phi(p^m) = p^m - p^{m-1} \quad \forall p \text{ primo e } \forall m \in \mathbb{N}/\{0\}$$

Formula generale: Sia $n \geq 2$ e $n = p_1^{m_1} \cdot p_2^{m_2} \cdot \dots \cdot p_k^{m_k}$ per qualche numero primo p_1, p_2, \dots, p_k con $p_i \neq p_j \forall i \neq j$ e $m_1, \dots, m_k \in \mathbb{N}/\{0\}$. Allora:

$$\phi(n) = \phi(p_1^{m_1} \cdot \dots \cdot p_k^{m_k}) = (p_1^{m_1} - p_1^{m_1-1}) \cdot \dots \cdot (p_k^{m_k} - p_k^{m_k-1})$$

Lemma: Dato $n > 0$, vale:

$$|(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*| = \phi(n)$$

Lemma: Dati $\alpha, \beta \in (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*$, valgono le seguenti affermazioni:

- $\alpha\beta \in (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*, \quad (\alpha\beta)^{-1} = \alpha^{-1}\beta^{-1}$
- $\alpha^{-1} \in (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*, \quad (\alpha^{-1})^{-1} = \alpha$

Teorema: Sia $n > 0$. Per ogni $\alpha \in (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*$, vale:

$$\alpha^{\phi(n)} = [1]_n \text{ in } \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$$

Equivalentemente, per ogni $a \in \mathbb{Z}$ tale che $(a, n) = 1$

$$a^{\phi(n)} \equiv 1 \pmod{n}$$

Corollario: Se p è un numero primo e $a \in \mathbb{Z}$ tale che $(p, a) = 1$, allora:

$$\text{Con } n = p \Rightarrow a^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}$$

Crittografia RSA

Fissiamo $n > 0$. Per ogni $c \in \mathbb{N}/\{0\}$, definiamo la funzione:

$$P_c : (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^* \rightarrow (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^* \\ \alpha \rightarrow \alpha^c$$

Ovvero $P_c(\alpha) := \alpha^c \quad \forall \alpha \in (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*$. La funzione P_c è ben definita, ovvero, se α è una classe di congruenza e n invertibile, allora anche α^c è invertibile

Teorema della crittografia RSA

Sia $c \in \mathbb{N}/\{0\}$ tale che $(c, \phi(n)) = 1$ e sia $d \in \mathbb{N}/\{0\}$ un inverso di c modulo $\phi(n)$ (ovvero $d > 0$ e $d \in [c]_{\phi(n)}^{-1}$), allora P_c è una funzione invertibile e vale $P_c^{-1} = P_d$

$$P_d = P_c^{-1} \Leftrightarrow \begin{array}{ll} p_d(P_c(\alpha)) = \alpha & \forall \alpha \in (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^* \\ p_c(P_d(\beta)) = \beta & \forall \beta \in (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^* \end{array}$$

Corollario: Siano $a, c \in \mathbb{Z}$ tale che $(a, n) = 1$ e $c > 0$. Considero la seguente congruenza in $x \in \mathbb{Z}$

$$x^c \equiv a \pmod{n}$$

Sia S l'insieme delle soluzioni della precedente congruenza, ovvero:

$$S := \{x \in \mathbb{Z} \mid x^c \equiv a \pmod{n}\}$$

allora se $(c, \phi(n)) = 1$ e $d > 0$ con $d \in [c]_{\phi(n)}^{-1}$, Allora

$$S = [a^d]_n = \{a^d + kn \in \mathbb{Z} \mid k \in \mathbb{Z}\}$$

Crittografia a chiave pubblica

Supponiamo che A voglia comunicare con B mediante RSA:

B pubblica $c, n \in \mathbb{N}/\{0\}$, c chiave di codifica e n modulo tale che $(c, \phi(n)) = 1$. A userà l'alfabeto $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*$. Se A comunica $\alpha \in (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*$, allora calcola α^c e lo invierà. Allora B $(c, \phi(n)) \rightarrow d > 0, d \in [c]_{\phi(n)}^{-1}$ con d chiave di decifratura. Quindi $\beta \rightarrow \beta^d = \alpha$

11 Eleventh week

Grafi: Dato un insieme V , indichiamo $\binom{V}{2}$ l'insieme i cui elementi sono tutti sottoinsiemi di V con 2 elementi, ovvero:

$$\binom{V}{2} := \{A \in 2^V \mid |A| = 2\}$$

Vale la formula:

$$|\binom{V}{2}| = \binom{|V|}{2} = \frac{|V|!}{2!(|V|-2)!} = \frac{|V|(|V|-1)}{2}$$

Def: Un grafo G è una coppia (V, E) , dove V è un insieme non vuoto detto *insieme dei vertici di G* e E è un sottoinsieme di $\binom{V}{2}$ detto *insieme dei lati di G* .

Se $G = (V, E)$ è un grafo ed $e = \{v_1, v_2\} \in E$, cioè un lato di G , allora diciamo che v_1 e v_2 sono degli estremi di e

Se G è un grafo, allora $V(G)$ indica l'insieme dei vertici e $E(G)$ l'insieme dei lati di G . Se $G = (V, E)$ è un grafo ed $e = \{v_1, v_2\} \in E$, cioè un lato di G , allora diciamo che v_1 e v_2 sono gli *estremi* di e ed anche che e congiunge v_1 e v_2

Esempi notevoli

- Per ogni $n \in \mathbb{N}$, definiamo il *cammino* P_n di lunghezza n come il seguente grafo

$$\begin{aligned} V(P_n) &= \{0, 1, \dots, n\} & E(P_n) &:= \emptyset \text{ se } n = 0 \\ & & E(P_n) &:= \{\{i, i+1\} \in \binom{V(P_n)}{2}\} \end{aligned}$$

- P_∞ il cammino infinito
- Per ogni $n \in \mathbb{N}$ con $n \geq 3$, il *ciclo* di lunghezza n è definito:

$$V(C_n) = \{1, 2, \dots, n\} \quad E(C_n) = \{\{i, i+1\} \in \binom{V(C_n)}{2}\} \cup \{\{1, n\}\}$$

- Per ogni $n \in \mathbb{N}$, $n \geq 1$, il *grafo completo* di n vertici, denotato con K_n , è definito:

$$V(K_n) = \{1, 2, \dots, n\}, \quad E(K_n) := \binom{V(K_n)}{2}$$

Sottografi e sottografi indotti

Siano $G = (E, V)$ e $G^I = (E^I, V^I)$ due grafi. Diremo che G^I è un sotto grafo di G se $V^I \subset V$ e $E^I \subset E$

Se G^I è sottografo di G vale:

$$E^I = \{e \in E \mid e = \{v_1, v_2\}, v_1 \in V^I, v_2 \in V^I\}$$

allora G^I si dice *sotto grafo* di G *indotto* da V^I e si indica con il simbolo $G[V^I]$

13/05/

Morfismi

Siano $G = (V, E)$ e $G^I = (V^I, E^I)$ due grafi, e $f : V \rightarrow V^I$ una funzione iniettiva. Allora si dice morfismo da G a G^I se vale:

$$\forall v_1, v_2 \in V, \{v_1, v_2\} \in E \Rightarrow \{f(v_1), f(v_2)\} \in E^I$$

Se $f : V \rightarrow V^I$ è un morfismo da G a G^I , allora scriveremo $f : G \rightarrow G^I$

Oss: Siano $G = (V, E)$ e $G^I = (V^I, E^I)$ due grafi, sia $f : G \rightarrow G^I$. Per ogni $e = \{v_1, v_2\} \in E$, allora:

$$f(e) = \{f(v_1), f(v_2)\} \in \binom{V^I}{2}$$

Definiamo $f(E) := \{f(e) \in \binom{V^I}{2} \mid e \in E\}$, segue che:

$$f(E) \subset E^I$$

Dunque f è un morfismo solo se $f(E) \subset E^I$

Isomorfismo

Diciamo che f è un isomorfismo da G in G^I se:

- f è bigiettiva
- f è morfismo da G in G^I
- $f^{-1} : V(G^I) \rightarrow V(G)$ è un morfismo da G^I in G . Se esiste un isomorfismo, allora G si dice isomorfo a $G^I \Rightarrow G \cong G^I$

Prop: Siano G, G^I due grafi e $f : V \rightarrow V^I$ una funzione. f è isomorfismo da G in G^I se e solo se:

- f è bigiettiva
- $f(E) = E^I$, ovvero $\forall e \in \binom{V}{2}, e \in E \Leftrightarrow f(e) \in E^I$

Passeggiate, cammini e cicli

Sia G una successione finita ordinata di vertici di G . Allora si dice:

- Passeggiata in G , se $n = 0$ oppure $n \geq 1$ e $\{v_i, v_{i+1}\} \in E \quad \forall i \in \{0, 1, \dots, n-1\}$
- Cammino in G , se è una passeggiata in G e $v_i \neq v_j \quad \forall i, j \in \{0, 1, \dots, n\}$
- Ciclo in G se è una passeggiata in G , $v_0 = v_n$ e $n \geq 3$, $v_i \neq v_j$

Se (v_0, v_1, \dots, v_n) è una passeggiata in G , allora n è detto lunghezza, $n = l(G)$

Def

Sia G un grafo e siano $v, w \in V$. Sono *congiungibili* in G con passeggiata se esiste una passeggiata in G della seguente forma: (v_0, v_1, \dots, v_n)

12 Dodicesima settimana

Congiungibilità

Sia $G = (V, E)$ e siano $v, w \in V$. Diciamo che v e w sono congiungibili con un cammino se esiste un cammino (v_0, v_1, \dots, v_n) tale che $v_0 = v$ e $v_n = w$

Prop: Sia $G = (V, E)$ e siano $v, w \in V$. Allora v e w sono congiungibili con un cammino se e soltanto se lo sono con una passeggiata

Oss: Dato un grafo $G = (V, E)$ e $v, w \in V$ diciamo che v e w sono congiungibili se lo sono per cammini o passeggiate

Prop: Sia $G = (V, E)$ e sia \sim la relazione binaria su V indotta dalla nozione di congiungibilità in G : $\sim \in \mathcal{P}(V \times V)$ è definita ponendo $v \sim w$ se v è congiungibile a w in G . Allora \sim è una relazione di equivalenza in V . Allora \sim è una relazione di equivalenza in V

Def: Sia $G = (V, E)$ e sia \sim la relazione di congiungibilità su V , indichiamo con $\{V_i\}_{i \in I}$ l'insieme di tutte le \sim classi d'equivalenza. I sotto grafi $\{G[V_i]\}_{i \in I}$ indotti da G su V_i si dicono *componenti connesse* di G

Grafi connessi

Un grafo si dice *connesso* se possiede una sola componente connessa. Altrimenti si definisce *sconnesso*

Oss:

- Sia G un grafo, allora G è connesso se e solo se ogni coppia di vertici di G è congiungibile in G
- Ogni componente connessa di G^I di G è un grafo connesso

Prop: Siano G e G^I due grafi e sia $f : G \rightarrow G^I$ un morfismo. Valgono:

- se $v, w \in V(G)$ tale che v è raggiungibile a w in G , allora $f(v)$ e $f(w)$ sono congiungibili in G^I
- Se f è un isomorfismo, allora $v \sim w$ in $G \Leftrightarrow f(v) \sim f(w)$ in G^I

Corollario: Siano G e G^I due grafi isomorfi, siano $\{G_i\}_{i \in I}$ le componenti connesse di G e $\{G_j^I\}_{j \in I}$ le componenti connesse di G^I . Allora G e G^I hanno lo stesso numero di componenti connesse e tali componenti sono 2 a 2 isomorfe. Più precisamente, $\exists \varphi : I \rightarrow J$ una bigezione tale che $G_i \cong G_{\varphi(i)}^I \quad \forall i \in I$

Corollario: Due grafi isomorfi sono entrambi connessi o non connessi

Relazione fondamentale tra gradi dei vertici e numero dei lati di un grafo finito

Def: Un grafo G è detto finito se ha un numero finito di vertici

Oss: Un grafo finito possiede anche un numero finito di lati.

Viceversa è falso, esistono grafi con infiniti vertici e finiti lati.

Def: Sia G un grafo finito e sia $v \in V$. Definiamo il grado $\deg_G(v)$ di v in G ponendo:

$$\deg_G(v) := |\{e \in E \mid v \in e\}|$$

(o numero di lati che escono da v)

20/05/

Prop: Sia $G = (V, E)$ un grafo finito. Allora:

$$\sum_{v \in V} \deg_G(v) = 2|E|$$

lemma delle strette di mano: In un grafo finito, il numero di vertici di grado dispari è pari

Def: Sia $G = (V, E)$ un grafo finito con n vertici, definiamo con *score* di G , con il simbolo $\text{score}(G)$, come la n -upla di interi uguali ai gradi dei vertici di G .

Diremo che lo score è in *forma canonica* se la successione è ordinata in modo non decrescente

Prop: Siano G e G^I due grafi isomorfi, vale:

$$\text{score}(G) = \text{score}(G^I)$$

Il contrario è falso, esistono grafi non isomorfi ma con score pari.

Grafi 2-connessi e grafi di Hamilton

Def: Sia $G = (V, E)$ un grafo finito con almeno 2 vertici e sia $v \in V$. Definiamo $G - v$ il grafico ottenuto da G rimuovendo v , ponendo:

$$V(G - v) := V \setminus \{v\}, \quad E(G - v) := \{e \in E, v \notin e\}$$

Def: un grafo G si dice *2-connesso* se ha almeno 3 vertici e $\forall v \in V(G)$, $G - v$ è connesso

Lemma: ogni grafo 2-connesso è anche connesso. il contrario non vale.

Def: Sia G un grafo. Un ciclo in G che attraversa tutti i vertici di G è detto *ciclo Hamiltoniano*. Se G ammette almeno un ciclo Hamiltoniano è detto *grafo Hamiltoniano*

Oss: Un Hamiltoniano è sempre un grafo finito e ha almeno 3 vertici

Lemma: Un grafo Hamiltoniano è anche 2-connesso

13 thirteenth week

Foglia: sia $G = (V, E)$ un grafico e sia $v \in V$. Diciamo che v è una *foglia* di G se $\deg_G(v) = 1$

Lemma: Un grafo 2-connesso o hamiltoniano non possiede foglie

Lemma: Siano G e G^I due grafi isomorfi. Valgono le seguenti affermazioni:

- G è 2-connesso solo se lo è anche G^I
- G è Hamiltoniano solo se lo è anche G^I

Note: per determinare l'isomorfismo di un grafo, possiamo verificare alcune caratteristiche:

- $\text{score}(G) = \text{score}(G^I)$
- G e G^I sono entrambi connessi o meno. Il numero di componenti connesse è lo stesso
- entrambi sono 2-connessi o meno
- entrambi sono Hamiltoniani o meno
- hanno lo stesso numero di sottocili
- scelto un vertice di G di grado k , allora tutti k vertici collegati a $f(v)$ devono avere lo stesso score di quelli collegati a v

Se tutte queste regole sono rispettate non per forza i due grafi sono isomorfi. Il modo più accurato per determinare l'isomorfismo è di generarne uno a mano

Lemma: Sia $n \in \mathbb{N}$ con $n \geq 1$, allora se $G = (V, E)$ è un grafo con n vertici, vale:

$$\deg_G(v) \leq n - 1 \quad \forall v \in V$$

Corollario: Sia $n \in \mathbb{N}$ con $n \geq 1$ e sua $d = (d_1, \dots, d_n) \in \mathbb{N}^n$ ordinato. Se $d_n > n - 1$ allora nessun grafo avrà d come score (ost 1)

Oss: Siano $n, m \in \mathbb{N}/\{0\}$ e sia $d \in \mathbb{N}^{n+m}$ in forma $(0_1, \dots, 0_m, d_1, \dots, d_n)$ ordinata. Definiamo d^I come d senza gli zero. Anche d^I è score del grafo

Lemma: Siano $n, k \in \mathbb{N}/\{0\}$ tale che $k < n$ e $h := n - k$ e d score in forma $(d_1, \dots, d_h, n - 1_1, \dots, n - 1_k)$ ordinata. Se $d_1 < k$ allora d non è score di un grafo (ost 2)

27/05

Lemma: Sia $n \in \mathbb{N}$ con $n \geq 3$, sia $d = (d_1, \dots, d_n) \in \mathbb{N}^n$ ordinato e sia L :

$$L := |\{i \in \{1, \dots, n - 2\} \mid d_i \geq 2\}|$$

Se $L < d_{n-1} + d_n - n$, allora d non è score di un grafo (ost3)

Lemma: Sia $n \in \mathbb{N}/\{0\}$ e $d \in \mathbb{N}^n$ un vettore ordinato tale che $d_1 \leq \dots \leq d_n \leq 2$. Vale:

- se $d = (0_1, \dots, 0_{n-1}, 2)$ oppure $n \geq 2$ e $d = (0_1, \dots, 0_{n-2}, 2, 2)$, allora non è un grafo
- Se $d = (0, \dots, 0)$ allora d è lo score di un grafo con n vertici isolati. Se esiste $m \in \mathbb{N}$ tale che $n \geq m \geq 3$ e $d = (0_1, \dots, 0_{n-m}, 2_1, \dots, 2_m)$ allora d è lo score del grafico con $n - m$ vertici isolati e m vertici in ciclo

Se per $k \in \mathbb{N}$ volte lo score è pari a 1 allora il grafo è formato da $k/2$ segmenti

Corollario: Se il numero di $d = 1$ è pari, allora d è lo score di un grafo solo se d non ha le forme:

$$d = (0, \dots, 0, 2) \quad \text{oppure} \quad d = (0, \dots, 0, 2, 2)$$

Teorema dello score

Sia $n \in \mathbb{N}$ con $n \geq 2$ e $d \in \mathbb{N}^n$ tale che $d_1 \leq \dots \leq d_n \leq n - 1$. definiamo il vettore ponendo:

$$d_i^I \begin{cases} d_i & \text{se } i < n - d_n \\ d_i - 1 & \text{se } i > n - d_n \end{cases} \quad \forall i \in \{1, \dots, n - 1\}$$

d è lo score di un grafo solo se lo è d^I

14 fourteenth week

Alberi

Un grafo si dice albero se è connesso e senza cicli. Una foresta è un grafo senza cicli

Teorema: Sia $T = (V, E)$ un grafo. Le seguenti affermazioni sono equivalenti:

1. T è un albero
2. Per ogni $v, v^I \in V$, esiste un unico cammino in T che congiunge v a v^I
3. T è connesso e, per ogni $e \in E$, il grafo $T - e$ è sconnesso
4. T non ha cicli e, per ogni $e \in \binom{V}{2} \setminus E$, il grafo $T + e$, definito ponendo $T + e := (V, E \cup \{e\})$, ha almeno un ciclo
5. T è connesso e soddisfa la seguente formula di eulero:

$$|V| - 1 = |E|$$

Lemma: Sia T un albero finito avente almeno 2 vertici. Allora T ha almeno 2 foglie

Osservazione: Il precedente lemma non vale se l'albero è infinito

Teorema: La connessione di T non può essere omessa per l'applicazione della formula di eulero

Corollario: Sia $n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$ e sia $d \in \mathbb{N}^n$. Allora esiste un albero con score d se e solo se:

$$n - 1 = \frac{1}{2}(\sum^n d_i)$$

15 Esercizi

15.1 Dimostrazione per induzione

Trovo una base dell'induzione $(0,1,\dots)$ e dimostro l'eguaglianza. Poi applico il passo induttivo $(n+1)$. Applico l'ipotesi induttiva, cioè faccio valere l'uguaglianza in n .

15.2 Sistema di congruenze

$$\text{Es: } \begin{cases} x \equiv 4 \pmod{112} \\ x \equiv 20 \pmod{50} \end{cases}$$

1. Compatibilità: Calcolo l'mcd dei due moduli tramite l'algoritmo di euclide e verifico che mcd divida la differenza tra i due valori. Grazie al teorema cinese del resto sapremo che l'insieme delle soluzioni è vuoto o meno. Mi tengo da parte la formula (1) che consiste nell'uguaglianza tra la differenza dei due valori e l'mcd dei due moduli per il loro moltiplicando

$$\begin{aligned} (112, 50) &= 2 & 2|20 - 4 \\ 20 - 4 &= 8 \cdot (112, 50)^{(1)} \end{aligned}$$

2. Calcolo di una soluzione: Proseguo con l'algoritmo di euclide e ottengo la formula (2). Adesso unisco le formule (1) e (2) ottenendo una soluzione del sistema

$$\begin{aligned} (112, 50) &= 50 \cdot 9 - 4 \cdot 112^{(2)} \\ 20 - 4 &= 8(9 \cdot 50 - 4 \cdot 112) \Rightarrow 20 - 72 \cdot (50) = 4 - 32 \cdot 112 = -3580 \end{aligned}$$

3. Calcolo di S: inserisco la soluzione trovata nella classe pari al mcm dei due moduli, normalizzo la classe e ottengo l'insieme delle soluzioni

$$\begin{aligned} [112, 50] &= \frac{122 \cdot 50}{(112, 50)} = 2800 \\ [-3500]_{2800} &= [2020]_{2800} \Rightarrow \{2020 + 2800k \in \mathbb{Z} \mid k \in \mathbb{Z}\} \end{aligned}$$

15.3 RSA

$$\text{Es: } x^{25} \equiv 8 \pmod{63}$$

1. Applicabilità: verifico che l'MCD tra valore e modulo e l'MCD tra esponente e phi del modulo diano come risultato 1, se si allora RSA è applicabile

$$\begin{aligned} (8, 63) &= (2^3, 3^2 \cdot 7) = 1 \\ (25, \Phi(63)) &= (25, 36) = (5^2, 2^2 \cdot 3^2) = 1 & \Phi(63) = (3^2 - 3^1)(7^1 - 7^0) = 6 \cdot 6 = 36 \end{aligned}$$

2. Calcolo di S: Applico l'algoritmo di Euclide al phi del modulo e l'esponente. Il risultato lo applico alla classe di Phi modulo. Applico le trasformazioni e ottengo l'inverso della classe dell'esponente. Utilizzo il risultato trovato e lo imposto come d. Risolvo la classe e ottengo la nostra soluzione

$$\begin{aligned} \text{algoritmo di euclide di } 25 \text{ e } 36 &\rightarrow 1 = 13 \cdot 25 + (-9)36 \\ [1]_{36} &= [13]_{36}[25]_{36} \Rightarrow [25]_{36}^{-1} = [13]_{36} \\ [8^{13}]_{63} &= [8]_{63}[8^2]_{63}^6 = [8]_{63} \Rightarrow S = \{8 + 63k \in \mathbb{Z} \mid k \in \mathbb{Z}\} \end{aligned}$$

15.4 Grafi

Ostruzioni isomorfismi

- Ostruzione 1 - Se $score(G^I) \neq score(G^{II})$, allora non sono un isomorfismo
- Ostruzione 2 - Se G^I e G^{II} hanno un numero diverso di componenti connesse, allora non sono un isomorfismo
- Ostruzione 3 - Se G^I e G^{II} non sono entrambi 2-connessi o meno, allora non sono un isomorfismo
- Ostruzione 4 - Se G^I e G^{II} non sono entrambi hamiltoniani o meno, allora non sono un isomorfismo
- Ostruzione 5 - Se G^I e G^{II} non hanno lo stesso numero di sotto grafi n-ciclici, allora non sono un isomorfismo
- Ostruzione 6 - Se i vertici adiacenti a $v^i \in V(G^I)$ e $f(v^I)$ non hanno lo stesso grado, allora non sono un isomorfismo

Ostruzioni score

- Ostruzione 1 - Se $d_n > n - 1$, allora d non è score di un grafo
- Ostruzione 2 - Se d è in forma $(d_1, \dots, d_h, n - 1_1, \dots, n - 1_k)$ e $d_1 < k$, allora d non è score di un grafo
- Ostruzione 3 - Se $d \in \mathbb{N}^n$ con $n \geq 3$ e sia $L = |\{i \in \{1, \dots, n-2\} \mid d_i \geq 2\}|$. Se $L < d_{n-1} + d_n - n$, allora d non è score di un grafo
- Ostruzione 4 - Se d possiede un numero dispari di componenti dispari, allora d non è score di un grafo

Teorema dello score: Applicabile se $d_n \leq n - 1$

Formula di Eulero: Uno score può essere un albero se rispetta l'uguaglianza $|V| - 1 = |E|$ sapendo che $|E| = \frac{1}{2} \sum d_i$

Forzatura alla connessione/sconnessione: Se un grafo rispetta $|E| < |V| - 1$ allora è un grafo sconnesso.

Al contrario se $v_0 \geq n - v_n - 1$ allora è un grafo connesso