Definizioni ed dimostrazioni di teoremi per il corso di Fondamenti Matematici per l'Informatica

Facchini Luca

A.A. 2023/24

Sommario

In questo documento sono presenti le definizioni e le dimostrazioni dei teoremi richiesti dal Prof. Ghiloni R. per l'esame del corso di Fondamenti Matematici per l'Informatica dell'anno accademico 2023/24.

Indice

Parte I
L'ordinamento dei numeri naturali è un buon ordinamento e seconda forma del principio di induzione

1 Ordinamento dei numeri naturali

Teorema I.1. *L'insieme dei numeri naturali* $\mathbb{N}$ *è un insieme ordinato rispetto alla relazione d'ordine* $\leq$.

Ipotesi I.1.1. *Sia* $A \subseteq \mathbb{N}$.

Tesi I.1.2. *se* $A \subseteq \mathbb{N}$ *non ha un minimo allora* $A = \emptyset$*, dunque* $\mathbb{N}$ *è un insieme ben ordinato.*

Dimostrazione. Definiamo con B il complementare di A, ($B := A^C = \mathbb{N} \setminus A$), verifichiamo l'ipotesi per induzione di prima forma su B, dunque che $\{0, 1, \ldots, n\} \in B \ \forall n \in \mathbb{N} \Rightarrow A = \emptyset$. Assumiamo che $\mathbb{N}$ non sia ben ordinato e che dunque se $A \neq \emptyset$ allora A non ha un minimo.

Base Induttiva ($0 \in B$)**.** Dunque $0 \notin A$ altrimenti questo ne sarebbe il minimo, dunque $\{0\} \subseteq B$ in quanto B è definito come il complementare di A.✓

Passo Induttivo ($n \in B \Rightarrow n + 1 \in B$)**.** Supponendo ora che $0, 1, \ldots, n \in B$, allora $0, 1, \ldots, n \notin A$, ciò implica che $n + 1 \in A$ questo però lo renderebbe un minimo il che è inammisibile in quanto A non ha un minimo per ipotesi. Dunque $n + 1 \in B$, e quindi $\{0, 1, \ldots, n, n + 1\} \subseteq B$. Il passo induttivo è verificato.✓

Dunque per induzione di prima forma su B abbiamo che $A = \emptyset$, e quindi $\mathbb{N}$ è un insieme ben ordinato.

■

2 Seconda forma del principio di induzione

Teorema I.2. *Seconda forma del principio di induzione:*

Ipotesi I.2.1. *Sia* $P(n)$ *una serie di proposizioni indicizzata su* $\mathbb{N}$*, assumendo che:*

1. $P(0)$ *sia vera.*
2. $\forall n \in \mathbb{N}$ *se* $P(0), P(1), \ldots, P(n)$ *sono vere.*

Tesi I.2.2. *Se le ipotesi sono verificate allora* $P(n)$ *è vera* $\forall n \in \mathbb{N}$.

Dimostrazione. Sia $A := \{n \in \mathbb{N} \mid P(n) \text{ è falsa}\}$, dimostriamo che $A = \emptyset$. Supponendo che $A \neq \emptyset \Rightarrow \exists n \in \mathbb{N} : n = \min(A)$.

Base Induttiva ($P(0)$)**.** Quindi abbiamo che esiste un minimo su A, per la bese induttiva (1) $0 \notin A$ dunque $0 \neq \min(A)$ in quanto $P(0)$ è vera.

Passo Induttivo ($P(n) \Rightarrow P(n + 1)$)**.** Inoltre se $k < n \quad k \notin A$ in quanto $n = \min(A)$ e dunque $P(k)$ è vera, a questo punto per il passo induttivo (2) abbiamo che $\forall k < n \quad P(k)$ è vera e dunque $P(n)$ è vera, il che và in contraddizione con la definizione dell'esistenza di un minimo su A. Dunque $A = \emptyset$, e quindi $P(n)$ è vera $\forall n \in \mathbb{N}$.

■

Parte II
Teorema dell'esistenza e dell'unicità del quoziente e del resto della divisione euclidea

3 Unicità e esistenza del quoziente e del resto della divisione euclidea

Teorema II.1. *Il quoziente ed il resto della divisione euclidea di un numero naturale n per un numero naturale $m \neq 0$ esistono ed sono unici.*

Ipotesi II.1.1. *Siano $n, m \in \mathbb{N}$ con $b \neq 0$.*

Tesi II.1.2. *Esistono ed sono unici due numeri naturali $q, r \in \mathbb{N}$ tali che* $\begin{cases} n = m \cdot q + r \\ 0 \leq r < m \end{cases}$.

Dimostrazione.

Esistenza. Si procede per induzione di seconda forma su n partendo da $n = 0$.

Base Induttiva $(n = 0)$**.** Per $n = 0$ si ha che $0 = 0 \cdot m + 0$, dunque $q = 0$ e $r = 0$ allora $\forall m \in \mathbb{Z}$ $P(0)$ è verificate.

Passo Induttivo $(\forall k < n\ P(k) \Rightarrow P(n))$**.** Per $n \geq 1$ si supponga che $\forall k < n\ P(k)$ sia verificata, dobbiamo verificare l'esistenza del quoziente e del resto della divisione euclidea di n per m.

$n < m \wedge n \geq 0$ allora $n = m \cdot 0 + n$, dunque $q = 0$ e $r = n$, e quindi $\forall n < m\ P(n)$ è verificata.

$n \geq m \wedge m > 0$ allora poniamo $k := n - m$, ovvervando che $0 \leq k < n$ allora per ipotesi induttiva $\exists q, r \in \mathbb{N}$ t.c. $\left\langle \begin{array}{c} k = m \cdot q + r \\ 0 \leq r < (n - m) \end{array} \right.$, vale quindi: $n = k + m = (qm + r) + m = (q + 1)m + r$ quindi il sistema è scrivibile come: $\begin{cases} n = m \cdot (q + 1) + r \\ 0 \leq r < m \end{cases}$, quindi il passo induttivo è stato fatto, e grazie al principio di induzione di 2° forma $\exists$ sempre q, r della divisione eucludea di n per m con $n, m \in \mathbb{N} \quad m > 0$.

$n < 0 \wedge m > 0$ Grazie alla dimostrazione precedente, $\exists q, r \in \mathbb{N}$ t.c. $\begin{cases} n = -m \cdot q + r \\ 0 \leq r < m \end{cases}$, Vale: $-n = qm + r \Rightarrow n = -qm - r = (-q)m - r$. Se $r = 0$ $n = (-q)m$, Supponendo che $r > 0$ ovvero $0 < r < m \Leftrightarrow 0 < m - r < m$ vale: $n = (-q)m - r = (-q)m - m + m - r = (-q - 1)m + (m - r)$, quindi: $-q - 1$ è il quoziente e $m - r$ è il resto, dunque $\forall n < 0\ P(n)$ è verificata.

$m < 0$ allora $-m > 0$ dunque $\exists q, r \in \mathbb{N}$ tali che $n = -m \cdot q + r$ con $0 \leq r < -m$, dunque $n = m \cdot q - r$, e quindi $q = -q$ e $r = -r$, e quindi $\forall m < 0\ P(n)$ è verificata.

Il passo induttivo è verificato, dunque per induzione di seconda forma su n abbiamo che esistono il quoziente ed il resto della divisione euclidea di n per m.

□

Unicità. Proviamo che $q = q', r = r'$: Se $r' > r$ a meno di riordinamento, allora vale che: $qm - q'm = r' - r \Leftrightarrow m(q - q') = r' - r$. Effettuando l'operazione al modulo otteniamo: $|m(q - q')| = |r' - r|$, dunque $|r' - r| < m$, questo è vero se e solo se $0 \leq |q - q'| < 1$, Questo implica che $q = q'$ in quanto $q, q' \in \mathbb{N}$. Quindi $mqr = mq' + r' \Rightarrow q = q'$ e $r = r'$. Quindi il quoziente ed il resto della divisione euclidea di n per m sono unici.

■

Parte III

Teorema di esistenza e unicità della rappresentazione in n base ≥ 2

4 Esistenza e unicità della rappresentazione in base $b \geq 2$

Teorema III.1. *Un numero naturale n può essere sempre rappresentato in base $b \geq 2$ in modo unico.*

Ipotesi III.1.1. *Siano $n, b \in \mathbb{N}$ con $b \geq 2$.*

Tesi III.1.2. *Esistono ed sono unici ($\exists!$) una rappresentazione di n in base b, ovvero una successione $\{\varepsilon_i\}$ con le seguenti proprietà:*

1. *$\varepsilon_{i\in\mathbb{N}}$ definitivamente nulla, ovvero dopo qualche $i_0 \in \mathbb{N} \Rightarrow \forall j > i_0 : \varepsilon_j = 0$.*
2. *$\varepsilon_i \in I_b := \{0, 1, \ldots, b-1\} \quad \forall i \in \mathbb{N} \quad (0 \leq \varepsilon_i < b)$.*
3. *$\displaystyle\sum_{i\in\mathbb{N}} \varepsilon_i \cdot b^i = n$.*

Inoltre se esiste $\{\varepsilon'_i\}_{i\in\mathbb{N}}$ rappresentazione di n in base b allora $\varepsilon_i = \varepsilon'_i \quad \forall i \in \mathbb{N}$.

Dimostrazione.

Esistenza. Si procede per induzione di seconda forma su n partendo da $n = 0$.

Base Induttiva $(n = 0)$**.** Per $n = 0$ si ha che $0 = 0 \cdot b^0$, dunque $\varepsilon_0 = 0$ e quindi $\forall n \in \mathbb{N}\ P(n)$ è verificata.

Passo Induttivo $(\forall k < n\ P(k) \Rightarrow P(n))$**.** Per $n \geq 1$ si supponga che $\forall k < n\ P(k)$ sia verificata, e dunque che esista una rappresentazione di k in base b. Eseguiamo la divisione euclidea di n per b, dunque $\exists q, r \in \mathbb{N}$ tali che $n = b \cdot q + r$ con $0 \leq r < b$, per ipotesi $b \geq 2$ dunque $0 < q < qb \leq qb + r = n$, per ipotesi induttiva è vero che q è rappresentabile come una successione $\{\delta_i\}_{i\in\mathbb{N}}$ con le proprietà (1),(2),(3), inoltre vale che:

$$
\begin{aligned}
n &= (\sum_{i\in\mathbb{N}} \delta_i b^i)b + n \Rightarrow n = \sum_{i\in\mathbb{N}} \delta_i b^{i+1} + r \quad \text{Definiamo: } \epsilon_0 &&= r \\
n &= \epsilon_0 + \sum_{j\geq 1} \delta_{j-1} b^j = \sum_{i\in\mathbb{N}} \epsilon_i b^i
\end{aligned}
$$

□

Unicità. Procediamo per induzione di seconda forma su n da $n = 0$

Base Induttiva $(n = 0)$**.** Per $n = 0$ $\epsilon_i = 0 \quad \forall i \in \mathbb{N}$, questa è l'unica rappresentazione di 0 in base b.

Passo Induttivo $(\forall k < n\ P(k) \Rightarrow P(n))$**.** Assumendo che esistano $\{\epsilon_i\}_{i\in\mathbb{N}} \quad \{\epsilon'_i\}_{i\in\mathbb{N}}$ coin le proprietà (1),(2),(3), proviamo che $\epsilon_i = \epsilon'_i \quad \forall i \in \mathbb{N}$. Dalla dimostrazine precendete osserviamo:

$$
\begin{aligned}
n = \sum_{i\in\mathbb{N}} \epsilon_i b^i = \sum_{i\in\mathbb{N}} \epsilon'_i b^i \\
\Rightarrow \epsilon_0 + b(\sum_{i\geq 1} \epsilon_i b^{i-1}) = \epsilon'_0 + b(\sum_{i\geq 1} \epsilon'_i b^{i-1})
\end{aligned}
$$

Dove ϵ_0 e ϵ'_0 sono i resti della divisione euclidea di n per b, in quanto questi uguali in entrambi i casi per il torema dell'unicità del quoziente e del resto questi sono uguali. Inoltre dato che $\sum_{i\geq 1} \epsilon_i b^{i-1} = \sum_{i\geq 1} \epsilon'_i b^{i-1}$ per ipotesi, dato che sono $< n$ allora la loro rappresentazione è unica quindi $\forall i > 1\ \epsilon_i = \epsilon'_i$, unendo, otteniamo che $\epsilon_i = \epsilon'_i \quad \forall i \in \mathbb{N}$. Il passo induttivo è stato fatto e l'unicità della rappresentazione è stata dimostrata.

■

Parte IV
Teorema di esistenza e unicità del massimo comune divisore e del minimo comune multiplo

5 Massimo comune divisore

Teorema IV.1. *Il massimo comune divisore tra due numeri n e m esiste ed è unico.*

Ipotesi IV.1.1. *Siano $n, m \in \mathbb{Z}$ con n, m non entrambi nulli.*

Tesi IV.1.2. *Esiste $\exists d$ che è MCD di n, m se:*

1. *$d|n$ e $d|m$.*
2. *se $c|n$ e $c|m$ allora $\Rightarrow c|d$.*

Inoltre: Se $\exists$ M.C.D tra n, m allora questo è unico e lo indichiamo con (n, m).

Lemma IV.1.3 (Lemma utile)**.** *d è espremibile come combinazione lineare di n e m.*

$$\exists x, y \in \mathbb{Z} : d = nx + my$$

Dimostrazione.

Unicità. Supponendo che $\exists d_1, d_2 \in \mathbb{N}$ che rispettino (1) e (2). Applichiamo allora queste ottenedo:

$$\begin{aligned} &(1)\ d_1|n \wedge d_1|m \\ &(2)\ c = d_1\ \ d_1|n \wedge d_1|m \Rightarrow d_1|d_2 \end{aligned}$$

applicando l'inverso si ottiene che $d_2|d_1$, dunque $d_1 = \pm d_2$, ma dato che $d_1, d_2 \in \mathbb{N}$ allora $d_1 = d_2$, e quindi il M.C.D è unico. □

Esistenza. Sia $S := \{nx+my \mid x, y \in \mathbb{Z}\}$, definito come l'insieme delle combinazioni lineari di n e m, questo insieme è non vuoto in quanto $nn + mm > 0 \in S$. Esiste dunque un minimo elemento in S, chiamiamolo $d = \min S$, vale che:

$$\begin{aligned} &d|n \wedge d|m \\ &\exists c \in \mathbb{Z} : c|n \wedge c|m \Rightarrow c|d \end{aligned}$$

in quanto $d \in S$. Dalla proprietà (2) si deduce

$$c|xm + ym$$

Si prova ora che $d|n$ tramite la divisione euclidea di n per d, ottendendo dunque $n = qd + r$, ponendo per assurdo che $r > 0$ allora $r \in S$ e quindi $d \neq \min S$ in quanto $r < d$, assumendo che sia vero:

$$\begin{aligned} r = n - qd &= n - q(xd + ym) = \\ &= n - qnx - qmy = \\ &= n(1 - qn) + m(-qy) \in S \end{aligned}$$

dunque è verificato che il resto della divisione euclidea è in S, e quindi che il $\min S \neq d$ ma per definzione $d := \min S$, il che è un assurdo e quindi $r = 0$ il che dimostra che $d|n$, analogamente si dimostra che $d|m$.

■

6 Minimo comune multiplo

Teorema IV.2. *Il minimo comune multiplo tra due numeri n e m esiste ed è unico.*

Ipotesi IV.2.1. *Siano $n, m \in \mathbb{Z}$*

Tesi IV.2.2. $\exists! M \in \mathbb{N}$ *che è m.c.m di n e m, se:*

1. $n|M \wedge m|M$.
2. *Se* $n|c \wedge m|c \Rightarrow M|c$ *per qualche* $c \in \mathbb{N}$.

Inoltre: Se $\exists$ m.c.m tra n e m allora questo è unico e lo indichiamo con $[n, m]$, e vale se n, m non sono entrambi nulli vale che: $[n, m] = \frac{n \cdot m}{(n,m)}$, altrimenti $[n, m] = 0$.

Dimostrazione.

Unicità. Supponiamo che esistano $M_1, M_2 \in \mathbb{N}$ che rispettino (1) e (2), applicando queste otteniamo:

$$\begin{aligned}&(1)\ M_1|n \wedge M_1|m\\&(2)\ c = M_1\ c|n \wedge c|m \Rightarrow M_1|c\end{aligned}$$

applicando l'inverso si ottiene che $M_2|c$, dunque $M_1 = \pm M_2$, ma dato che $M_1, M_2 \in \mathbb{N}$ allora $M_1 = M_2$, e quindi il m.c.m è unico. □

Esistenza. Supponendo che n, m non sono entrambi nulli, altrimenti $[n, m]\exists := 0$ allora:

$$\begin{aligned}\Rightarrow (n, m) \mid n \Leftrightarrow n = n'(n, m) \qquad &\text{per qualche } n' \in \mathbb{Z}\\ \Rightarrow (n, m) \mid m \Leftrightarrow m = m'(n, m) \qquad &\text{per qualche } m' \in \mathbb{Z}\end{aligned}$$

Definendo $M := \frac{n \cdot m}{(n,m)}$ e sostituendo n, m otteniamo che:

$$M = \frac{n'm'(n, m)(n, m)}{(n, m)} = n'm'(n, m)$$

ma per per la proprietà associativa della moltiplicazione, e per la definizione precedente di n', m' otteniamo che:

$$M = \begin{cases}(n'(n, m))m' & = nm'\\(m'(n, m))n' & = n'm\end{cases} \Rightarrow n'm = nm'$$

quindi la proprietà (1) è verificata perchè $n|M$ e $m|M$. Per verificare la proprietà (2) controlliamo che per $c \in \mathbb{Z}$ vale che $n|c \wedge m|c \Rightarrow M|c$?

$$\begin{matrix}(n, m)|n, n|c \Rightarrow (n, m)|c\\(n, m)|m, m|c \Rightarrow (n, m)|c\end{matrix} \Rightarrow c = c'(n, m)$$

Inoltre per definizione di $n', m' \Rightarrow (n', m') = 1$, dunque $n'|c' \wedge m'|c' \Rightarrow n'm'|c'$, moltiplicando l'equazione per (n, m) otteniamo: $n'm'(n, m)|c'(c, m) \Rightarrow M|c$, dunque la proprietà (2) è verificata e l'esistenza dimostrata.

■

Parte V
Teorema fondamentale dell'aritmetica

7 Teorema di esistenza e unicità della fattorizzazione in numeri primi

Teorema V.1. *Ogni numero naturale $n \geq 2$ è scrivibile come prodotto di numeri primi in modo unico, a meno*

Ipotesi V.1.1. *Sia un numero $n \in \mathbb{Z}, n \geq 2$.*

Tesi V.1.2. *Esistono numeri primi $p_1, p_2, \ldots, p_k > 0$ tali che $n = p_1 \cdot p_2 \cdot \ldots \cdot p_k$. Se anche $q_1, q_2, \ldots, q_l$ sono numeri primi tali che $n = q_1 \cdot q_2 \cdot \ldots \cdot q_l$ allora esiste una bigezzione $\delta : \{1, 2, \ldots, l\} \to \{1, 2, \ldots, k\}$ tale che $q_i = p_{\delta(i)}$.*

Dimostrazione.

Esistenza. Si procede perinduzione di 2° forma shiftata su n, partendo da $n = 2$. Se $n = 2$ è scrivibile come prodotto di numeri primi e ogni numero $k < n$ è scrivibile come prodotto di numeri primi allora n è scrivibile come prodotto di numeri primi.

Base Induttiva $(n = 2)$**.** Per $n = 2$ si ha che $2 = 2$, dunque 2 è scrivibile come prodotto di numeri primi.

Passo Induttivo $(\forall k < n \ P(k) \Rightarrow P(n))$**.** Per $n > 2$ si supponga che $\forall k < n \ P(k)$ sia verificata, e dunque che k sia scrivibile come prodotto di numeri primi, la dimostrazione si suddivide in due casi:

- Se n è primo allora n è scrivibile come prodotto di numeri primi.
- Se n non è primo allora esstono almento due numeri d_1, d_2 tali che $1 < d_1, d_2 < n \quad n = d_1 \cdot d_2$. Per ipotesi induttiva in quanto $d_1, d_2 < n$ allora d_1, d_2 sono scrivibili come prodotto di numeri primi: $d_1 = p_1 \cdot p_2 \cdot \ldots \cdot p_k$ e $d_2 = q_1 \cdot q_2 \cdot \ldots \cdot q_l$, dunque $n = p_1 \cdot p_2 \cdot \ldots \cdot p_k \cdot q_1 \cdot q_2 \cdot \ldots \cdot q_l$, e quindi n è scrivibile come prodotto di numeri primi.

Il passo induttivo è verificato, dunque per induzione di 2° forma shiftata su n abbiamo che n è scrivibile come prodotto di numeri primi. □

Unicità. Siano $n = p_1 \cdot p_2 \cdot \ldots \cdot p_k = q_1 \cdot q_2 \cdot \ldots \cdot q_h$ con p_i, q_j numeri primi, inoltre si supponga che per $k \leq h$. Si procede per induzione di seconda forma shiftata su k da $k = 1$.

Base Induttiva $(k = 1)$**.** Per $k = 1$ si ha che $n = p_1 = q_1 \cdot q_2 \cdot \ldots \cdot q_h$ dunque $q_j | p_1 \forall i \in \{1, 2, \ldots, h\}$, il che è possibile ma $\Leftrightarrow q_j = \pm 1 \vee q_j = \pm p_1$, in quanto però abbioamo definito per ipotesi che $q_j > 1$ allora l'unica possibilità è che $q_j = p_1$, ma se $h > 1$ allora $q_j = p_1 \quad \forall j \in \{1, 2, \ldots, h\}$, che comporta che se $h > k \Rightarrow n = q_1 \ldots q_h \geq q_1 q_2 \Rightarrow p_1^2 > p_1$ in quanto $p_1 > 1$, il che è un assurdo, dunque $h = k = 1$, e quindi $n = p_1 = q_1$.

Passo Induttivo $(\forall h < k \ P(h) \Rightarrow P(k))$**.** Sia ora $k > 1$ allora $p_k | n = q_1 \ldots q_n$ dunque in quanto $q_1, \ldots, q_n$ sono primi $\exists$ almeno un $p_k | q_j$ allora $p_k = q_j$ in quanto come detto precedentemente p_k, q_k primi > 1. Seguendo la divisione euclidea $p_1 \cdot \ldots p_{k-1} = q_1 \cdot \ldots \cdot q_{j-1} \cdot q_{j+1} \cdot \ldots \cdot q_n$, questi sono numeri $< n$ per ipotesi induttiva dunque hanno lo stesso numero di elementi: $k - 1 = h - 1$ e che eiste una bigezzione $\delta : \{1, 2, \ldots, h-1\} \to \{1, 2, \ldots, k-1\}$, possiamo ora definire una bigezzione $\sigma : \{1, 2, \ldots, h\} \to \{1, 2, \ldots, k\}$ tale che:

$$\sigma(i) : \begin{cases} \delta(i) & \text{se } i \neq j \\ k & \text{se } i = j \end{cases}$$

dunque è stata definita una bigezzione tale che $q_i = p_{\sigma(i)} \quad \forall i \in \{1, 2, \ldots, h\}$.

Il passo induttivo è verificato, dunque per induzione di seconda forma shiftata su k abbiamo che se n è scrivibile come prodotto di numeri primi allora questa è unica a meno di riordinamento in quanto esiste una bigezione tra gli indici delle sequenze di numeri primi. ■

Parte VI
Teorema cinese del resto

8 Teorema cinese del resto

Teorema VI.1.

Ipotesi VI.1.1. *Siano $a, b, n, m \in \mathbb{Z}$ tali che $n, m > 0$ e sia il seguente sistema di congruenze:*

$$\begin{cases} x \equiv a \mod n \\ x \equiv b \mod m \\ x \in \mathbb{Z} \end{cases}$$

Tesi VI.1.2. *Il sistema ha soluzione se e solo se $(n,m)|b-a$, inoltre se c è una soluzione allora gli elementi di $[c]_{[n,m]}$ sono tutte e sole le soluzioni del sistema (le soluzioni in $\mathbb{Z}$ sono: $c + k[n,m] \in \mathbb{Z} \quad k \in \mathbb{Z}$).*

Dimostrazione. Sia c una soluzione allora esistono $h, k \in \mathbb{Z}$ tali che $c = a + hn = b + km$ in quanto $x \equiv a \mod n$ e $x \equiv b \mod m \Rightarrow [x]_n = [a]_n \Rightarrow x = a + kn$, e $x = b + km$, dunque $a + kn = b + km \Rightarrow a - b = kn - km \Rightarrow a - b = k(n - m) \Rightarrow (n,m)|a - b$. Da prima possiamo dire che $a - b = hn + km$ e che quindi $a - hm = b + kn = c$. Si noti come c risolvi entrambe le equazioni. Sia ora $S := \{x \in \mathbb{Z} \mid x \text{ risolve il sistema}\}$ "l'insieme di tutte le soluzioni", bisogna provare che se $c \in S$a allora $S = [c]_{[n,m]}$ e inoltre cse c' è una soluzione allora $c' \in [c]_{[n,m]}$. Quindi $c = a + hn = b + km \quad c' = a + h'n = b + k'm$, dunque $c - c' = h - h'n = k - k'm$, e quindi $c - c' = h - h'n = k - k'm$, dunque sottraendo c a c' si ottiene che: $c - c' = \cancel{a} + hn - \cancel{a}h'n = (h - h')n$ e $c - c' = \cancel{b} + km - \cancel{b}k'm = (k - k')m$, dunque $n|c - c'$ e $m|c - c'$. Allora $[n,m]|c - c'$, e $c' \equiv c \mod [n,m]$, dunque $c' \in S$.

■

Parte VII
Teorema di Fermat-Eulero e Crittografia RSA

Lemma VII.0.1. *Sia $n \in \mathbb{N} \quad n \geq 2$. Allora $n = p_1^{m_1} \cdot p_2^{m_2} \cdot \ldots \cdot p_k^{m_k}$ con p_i numeri primi a due a due distinti, allora vale che:*

- $\phi(n) = \phi(p_1^{m_1}) \cdot \phi(p_2^{m_2}) \cdot \ldots \cdot \phi(p_k^{m_k})$, *in quanto p_i è primo allora*
- $\Rightarrow (p_1^m - p_1^{m-1}) \cdot (p_2^m - p_2^{m-1}) \cdot \ldots \cdot (p_k^m - p_k^{m-1})$.

Lemma VII.0.2. *Siano $\alpha, \beta \in (\mathbb{Z}/_{n\mathbb{Z}})^*$, allora:*

- $(\alpha\beta)^{-1} = \alpha^{-1}\beta^{-1}$
- $(\alpha^{-1})^{-1} = \alpha$

Dimostrazione. Verifichiamo che la moltiplicazione tra le classi α, β moltiplicata per le inverse esiste in quanto $\alpha, \beta \in (\mathbb{Z}/_{n\mathbb{Z}})^*$, questa risulterà la classe di $[1]_n$ dunque che $(\alpha\beta)(\beta^{-1}\alpha^{-1}) = [1]_n$.

- $(\alpha\beta)(\alpha^{-1}\beta^{-1}) = \alpha(\beta\beta^{-1})\alpha^{-1}$ per la proprietà distributiva e associativa del prodotto in $(\mathbb{Z}/_{n\mathbb{Z}})^*$, dunque $(\alpha(\beta\beta^{-1})\alpha^{-1} = \alpha[1]_n\alpha^{-1} = \alpha\alpha^{-1} = [1]_n$, dunque $\alpha\beta)^{-1} = \alpha^{-1}\beta^{-1}$ ✓.
- $(\alpha^{-1})^{-1}\alpha^{-1} = \alpha^{-1}(\alpha^{-1})^{-1} = [1]_n$, dunque $(\alpha^{-1})^{-1} = \alpha$.

□

9 Teorema di Fermat-Eulero

Teorema VII.1. *Una qualsiasi classe invertibile elevata alla funzione di eulero è congruente alla classe unitaria.*

Ipotesi VII.1.1. *Sia* $n > 0$.

Tesi VII.1.2. *allora* $\forall [\alpha]_n \in (\mathbb{Z}/_{n\mathbb{Z}})^* \Rightarrow [\alpha]^{\phi(n)} = [1]_n$. *Notare come le classi prese in considerazione sono invertibili.*

Dimostrazione. Definiamo la funzione $L_\alpha : (\mathbb{Z}/_{n\mathbb{Z}})^* \to (\mathbb{Z}/_{n\mathbb{Z}})^*$ definita come $\beta \to \alpha\beta$. La presente è ben definitita per il lemma appena dimostrato, questa funzione è bigettiva, dimostriamo l'iniettività in quanto la surgettività ne sarà una conseguenza in quanto l'insieme di partenza e di arrivo sono uguali (vedi lemma cassetti). Supponiamo dunque, per assurdo, $\exists \beta_1, \beta_2 \in (\mathbb{Z}/_{n\mathbb{Z}})^*$ tali che $L_\alpha(\beta_1) = L_\alpha(\beta_2) \Rightarrow \alpha\beta_1 = \alpha\beta_2 \to \beta_1 = (\alpha\alpha^{-1})\beta_1 = (\alpha^{-1})(\alpha\beta_1) \Leftrightarrow (\alpha^{-1})(\alpha\beta_2) = (\alpha^{-1}\alpha)\beta_2 = \beta_2$, dunque $\beta_1 = \beta_2$, e quindi L_α è iniettiva. Avendo dimostrato la bigettività di L_α possiamo dire che $L_\alpha(\beta_1)\dots L_\alpha(\beta_k) = \alpha\beta_1 \cdot \dots \cdot \alpha\beta_k$ inoltre essendo il prodotto su $(\mathbb{Z}/_{n\mathbb{Z}})^*$ associativo possiamo dire che il precedente è $= \alpha^k(\beta_1 \dots \beta_k)$, in quanto $\beta_1, \dots, \beta_k$ sono tutti e i soli elementi in $(\mathbb{Z}/_{n\mathbb{Z}})^*$ allora $\beta_1 \cdot \dots \cdot \beta_k = \alpha^k(\beta_1 \cdot \dots \cdot \beta_k)$ moltiplicando a sinistra e destra per $\beta_1^{-1} \cdot \dots \cdot \beta_k^{-1}$ ottenimao che $[1]_n = \alpha^k$, in quanto come dimostrato k è in numero di classi in $(\mathbb{Z}/_{n\mathbb{Z}})^*$ e dunque $k = \phi(n) \Rightarrow [1]_n = \alpha^{\phi(n)} \quad \forall \alpha \in (\mathbb{Z}/_{n\mathbb{Z}})^*$.

■

10 Teorema fondamentale della crittografia RSA

Teorema VII.2. *Una classe invertibile elevata ad un esponente d è congruente alla classe unitaria se e solo se d è l'inverso moltiplicativo di c modulo* $\phi(n)$.

Ipotesi VII.2.1. *Sia* $c > 0$ *tale che:* $(c, \phi(n)) = 1$ *con n fissato* > 0 *e* $d > 0 : d \in [c]^{-1}_{\phi(n)}$.

Tesi VII.2.2. *Allora* P_c *è invertibile, e la sua inversa è* $P_c^{-1} = P_d$ *dunque che* $[d]_{\phi(n)}[c]_{\phi(n)} = [1]_{\phi(n)}$.

Dimostrazione. Questo è equivalente a dire che: $cd \equiv 1(\mod \phi(n)) \Rightarrow \exists k \in \mathbb{Z} : cd = 1 + k\phi(n)$, applicando ora P_c, P_d su una α classe otteniamo: $P_d(P_c(\alpha)) = (\alpha^c)^d = \alpha^{cd} = \alpha^{1+k\phi(n)} = \alpha\alpha^{k\phi(n)} = \alpha$, il che è verificato per le proprietà delle potenze e del prodotto in $(\mathbb{Z}/_{n\mathbb{Z}})^*$ e in quanto $\alpha^{\phi(n)} = 1$ per il teorema di eulero. Quindi questo dimostra che $P_d(P_c(\alpha)) = \alpha$, equivalentemente $[c]_{\phi(n)}[d]_{\phi(n)} = [1]_{\phi(n)}$ il che significa che P_c è invertibile e che la sua inversa è P_d.

■

Parte VIII
Teorema di equivalenza tra la congiungibilità con cammini e la congiungibilità con passeggiate e Teorema la relazione di congiungibilita è una relazione di equivalenza

11 Teorema di equivalenza tra la congiungibilità con cammini e la congiungibilità con passeggiate

Teorema VIII.1. *Due vertici di un grafo sono congiungibili per cammini se e solo se sono congiungibili per passeggiate.*

Ipotesi VIII.1.1. *Supponendo di avere $G = (V, E)$ un grafo e $u, v \in V$ due vertici di G.*

Tesi VIII.1.2. *Allora u è congiungibile con v in G per cammini se e solo $\Leftrightarrow$ se u è congiungibile con v in G per passeggiate.*

Dimostrazione.

- $\Rightarrow$ Banale, in quanto un cammino è una particolare passeggiata per definitzione.
- $\Leftarrow$ Supponiamo che u, v siano congiungibili in G per passeggiate, allora definitmo: $\mathcal{P} := \{P \mid \text{P è una passeggiata da u a v}\}$ L'insieme delle passeggiate da u a v in G. $\mathcal{A} := \{n \in \mathbb{N} \mid \exists P \in \mathcal{P} : L(P) = n\}$ L'insieme delle lunghezze delle passeggiate da u a v in G. In quanto $\mathcal{A} \subseteq \mathbb{N}$ allora grazie al teorema del buon ordinamento di $\mathbb{N}$ allora:

  $$\begin{aligned} \exists! \min(\mathcal{A}) \Leftrightarrow & \exists P_0 \in \mathcal{P} : L(P_0) = \min(\mathcal{A}) = m \\ \Rightarrow & L(P_0) \leq L(P) \quad \forall P \in \mathcal{P} \end{aligned}$$

  Dunque esiste un minimo dell'insieme $\mathcal{A}$. Dimostriamo ora per assurdo che P_0 sia un cammino da v a w: Assumendo che P_0 non sia un cammino da u a v: $P_0 = \{v_0, \dots, v_{i-1}, v_i, v_{i+1}, \dots, v_{j-1}, v_j, v_{j+1}, \dots, v_k)\}$, dunque $\exists i, j \in \{0, 1, \dots, k\}$ tali che $v_i = v_j$, possiamo definire una passeggiata P_1 tale che $P_1 := \{u = v_0, \dots, v_{i-1}, v_i = v_j, v_{j+1}, \dots, v_{k=v})\}$, dunque $L(P_1) = L(P_0) - (j - i)$, in quanto $j - i \geq 1$ allora $L(P_1) < L(P_0)$, il che lo renderebbe un minimo, ma questo è un assurdo in quanto va contro la definizione di P_0 come minimo, dunque per assurdo P_0 è un cammino da u a v.

■

12 La relazione di congiungibilità è una relazione di equivalenza

Teorema VIII.2. *La relazione di congiungibilità in un grafo è una relazione di equivalenza su V.*

Ipotesi VIII.2.1. *Dato $G = (V, E)$ un grafo,*

Tesi VIII.2.2. *La relazione di congiungibilità in G su V è una relazione di equivalenza su V dunque:*

1. *Riflessiva:* $u \sim u \quad \forall u \in V$
2. *Simmetrica:* $u \sim v \Rightarrow v \sim u \quad \forall u, v \in V$
3. *Transitiva:* $u \sim v \wedge v \sim w \Rightarrow u \sim w \quad \forall u, v, w \in V$

Dimostrazione.

1. È verificana in quanto la passeggiata $P = (u)$ è una passeggiata da u a u.

2. È verificabile in quato se esiste una passeggiata $P = (u = v_0, v_1, \ldots, v_k = v)$ possiamo definire un'altra passeggiata $P' = (v = v_k, v_{k-1}, \ldots, v_0 = u)$ detta "inversa" che è una passeggiata da v a u.

3. Supponendo ora che esistano le passeggiate $P_0 = (u = u_0, u_1, \ldots, u_k = v)$ e $P_1 = (v = v_0, v_1, \ldots, v_h = w)$ allora possiamo definire una passeggiata $P_2 = (u = v_0, v_1, \ldots, u_{k-1}, u_k = v = v_1, v_2, \ldots, v_h = w)$ che è una passeggiata da u a w.

■

Parte IX

Teorema della relazione fondamentale tra il numero dei lati e i gradi dei vertici di un grafo finito e Lemma delle strette di mano

13 Teorema della relazione fondamentale tra il numero dei lati e i gradi dei vertici di un grafo finito

Teorema IX.1.

Ipotesi IX.1.1. *Sia $G = (V, E)$ un grafo finito.*

Tesi IX.1.2. *Allora vale* $2|E| = \sum_{v \in V} \deg_G(v)$

Dimostrazione. Sia $V = \{v_1, \ldots, v_n\}$ i vertici di G e $E = \{e_1, \ldots, e_k\}$ i lati di G con $k := |E|$. Sia ora:

$$M_{ij} := \begin{cases} 0 & v_i \notin e_j \\ 1 & v_i \in e_j \end{cases} \quad \forall i \in \{1, \ldots, n\}, j \in \{1, \ldots, k\}$$

ovvero la matrice di adiacenza del grafo G. Allora:

$$(1) \quad \sum_{j=1}^{k} \left(\sum_{i=1}^{n} M_{ij} \right) = \sum_{i=1}^{n} \left(\overbrace{|\{e \in E \mid v_i \in e\}|}^{\text{def. } \deg_G(v)} \right) = \sum_{i=1}^{n} \deg_G(v_i)$$

$$(2) \quad \sum_{i=1}^{n} m_{ij} = |\{i \in \{1, \ldots, n\} \mid v_i \in e_j\}| = 2 \Rightarrow \sum_{i=1}^{n} \left(\sum_{j=1}^{k} M_{ij} \right) = \sum_{j=1}^{k} 2 = 2k = 2|E|$$

quindi per la proprietà commutativa della somma possiamo dire che:

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{k} m_{ij} = \sum_{j=1}^{k} \sum_{i=1}^{n} m_{ij} \overbrace{=}^{(1)} \sum_{i=1}^{n} \deg_G(v_i) \overbrace{=}^{(2)} 2|E|$$

■

14 Lemma delle strette di mano

Teorema IX.2.

Ipotesi IX.2.1. *Sia $G = (V, E)$ un grafo finito.*

Tesi IX.2.2. *Il numero di vertici con grado dispari è pari.*

Dimostrazione. Definiamo $D := \{v \in V \mid 2 \not| \deg_G(v)\}$ l'insieme dei vertici con grado dispari e $P := \{v \in V \mid 2 | \deg_G(v)\}$ l'insieme dei vertici con grado pari $\Rightarrow P \cap D = \emptyset \wedge P \cup D = V$. Grazie alla relazione dondamentale dei grafi finiti:

$$2|E| = \sum_{v \in V} \deg_G(v) = \sum_{v \in P} \deg_G(v) + \sum_{v \in D} \deg_G(v)$$
$$\sum_{v \in D} \deg_G(v) = 2|E| - \sum_{v \in P} \deg_G(v)$$

In quanto $\deg_G(v)$ $\forall v \in P$ è pari allora $\sum_{v \in P} \deg_G(v)$ è pari in quanto somma di numeri pari, inoltre $2|E|$ è pari in quanto qualsiasi numero moltiplicato per un numero pari è pari. Allora $\sum_{v \in D} \deg_G(v)$ è pari perchè è sottrazzione di pari, ma in quanto $\deg_G(v)$ $\forall v \in D$ è dispari allora la somma di questi è pari $\Leftrightarrow$ il numero di vertici con grado dispari è pari.

■

Parte X
Teorema caratterizzante degli alberi finiti

15 Teorema caratterizzante degli alberi finiti

Teorema X.1.

Ipotesi X.1.1. *Sia $T = (V, E)$ un grafo finito*

Tesi X.1.2. *Allora le seguenti affermazioni sono equipotenti:*

1. *T è un albero.*
2. *$\forall v, v' \in V(T) \quad \exists!$ cammino da v a v'.*
3. *T è connesso e $\forall e \in E(T), T - e := (V, E \setminus \{e\})$ non è connesso.*
4. *T non ha cicli e $\forall e \in \binom{V}{2} \setminus E(T), T + e := (V, E \cup \{e\})$ ha almeno un ciclo.*
5. *T è connesso e $|E| = |V| - 1$.*

Dimostrazione.

$1 \Rightarrow 5$) Si procede per induzione di prima forma su $|V(T)|$ partendo da $|V(T)| = 1$.

Base Induttiva ($|V(T)| = 1$)**.** In questo caso $T = (\{v\}, \emptyset)$ è un albero in quanto un singolo vertice, e $|E| = 0, |V| = 1 \Rightarrow |E| = |V| - 1 = 0$. ✓

Passo Induttivo ($|V(T)| \geq 2 \quad |V(T) - 1| \Longrightarrow$)**.** In quanto $|V(T)| \geq 2$ allora per il "Lemma delle foglie" questo ha almeno due foglie, sia dunque v una di queste, allora: il grafo $T - v$ è un albero per il lemma sopracittato. Vale che $|V(T - v)| = |V(T)| - 1$, e $|E(T - v)| = |E(T)| - 1$, in quanto v è una foglia (e quinidi $\deg_T(v) = 1$) allora:

$$|V(T - v)| - 1 = |E(T - v)|$$
$$|V(T)| \cancel{-1} - 1 = |E(T)| \cancel{-1} - 1$$
$$|V(T)| - 1 = |E(T)|$$

il che è verificato in quanto $T - v$ è un albero e $|V(T - v)| = |V(T)| - 1$, dunque T è connesso e $|E| = |V| - 1$.

□

$1 \Leftarrow 5$) Si procede per induzione di prima forma su $|V(T)|$ partendo da $|V(T)| = 1$.

Base Induttiva $(|V(T)| = 1)$**.** Per $|V(T)| = 1$ abbiamo che $T = (\{v\}, \emptyset)$ verifica $|E| = |V| - 1 = 0$ ed è un albero in quanto è un singolo vertice.

Passo Induttivo $(|V(T)| \geq 2 \quad |V(T) - 1| \implies |V(T)|)$**.** Sia T un grafo connesso che verifica la formula di Eulero $|E| = |V| - 1$ con $|V(T)$. Sapendo che T è connesso si dimostra per assurdo come questo abbia almeno una foglia:

Dimostrazione. Supponiamo per assurdo che T non abbia foglie, quindi $\forall v \in V(T) \ \deg_T(v) \geq 2$, inoltre sappiamo per ipotesi che l'equazione di eulero è verificata, dunque:

$$\begin{aligned} 2|E| &= \sum_{v \in V(T)} \deg_T(v) \\ 2(|V| - 1) &= \sum_{v \in V(T)} \deg_T(v) \\ 2|V| - 2 &= \sum_{v \in V(T)} \deg_T(v) 2|V| - 2 \quad \geq 2|V| \\ -2 &\geq 0 \end{aligned}$$

questo significa che se T non avesse foglie allora T non sarebbe connesso, il che è un assurdo, dunque T ha almeno una foglia. □

Prendiamo in considerazione ora una foglia $v \in V(T)$, allora $T - v$ è un grafo connesso in quanto T è connesso e v ne è una sua foglia, vale inoltre che:

$$\begin{aligned} |V(T - v)| &= |V(T)| - 1 \\ |E(T - v)| &= |E(T)| - 1 \\ |V(T - v)| - 1 &= |E(T - v)| \\ |V(T)| - 1 - 1 &= |E(T)| - 1 \\ |V(T)| - 2 &= |E(T)| - 1 \\ |V(T)| - 1 &= |E(T)| \end{aligned}$$

il che conferma l'ipotesi induttiva, dunque T è un albero in quanto connesso e $T - v$ è un albero per ipotesi induttiva, □

Verifichiamo inoltre che T sia un albero, prendiamo per assurdo che $\exists$ un ciclo c in T, ogni vettore $v_i \in c$ ha $\deg_T(v_i) \geq 2$ altrimenti questo non potrebbe essere un ciclo, ma in quanto v è una foglia allora c è anche un ciclo in $T - v$, il che và contro l'ipotesi induttiva, dunque T è un albero. □

Dunque in conclusione possiamo dire che il passo induttivo è stato fatto e che se il grafo T è connesso e $|E| = |V| - 1$ allora T è un albero.

■

Parte XI
Teorema di esistenza dell'albero di copertuta per i grafi finiti

16 Teorema di esistenza dell'albero di copertura per i grafi finiti

Teorema XI.1.

Ipotesi XI.1.1. *Sia $G = (V, E)$ un grafo finito connesso.*

Tesi XI.1.2. *G ammette almeno un albero di copertura.*

Dimostrazione. Definiamo il seguente insieme:$e := \{c : c$ è un sottografo connesso di G $\wedge V(c) = V(G)\}$ in quanto $G \in e$ allora $\Rightarrow E \neq \emptyset$. Definiamo inoltre $S := \{n \in \mathbb{N} : n = |E(C)|$ per qualche $c \in e\}$ l'insieme delle cardinalità degli insiemi di lati dei sottografi connessi di G, anche questo non è vuoto ($S \neq \emptyset$) in quanto $|E(G)| \in S$, in quanto G è un sottografo connesso di G. Dato che l'insieme $S \subseteq \mathbb{N} \wedge S \neq \emptyset$ allora per il teorema del buon ordinamento di $\mathbb{N}$ S ha un minimo, definiamo questo minimmo: $\exists \bar{C} \in e : \min(S) = \left|V(\bar{C})\right|$. Per costruzuione $V(\bar{C}) = V(G)$, dimostriamo dunque per assurdo ce $\bar{C}$ è un albero: Se $\bar{C}$ non fosse un albero allora $\exists e \in E(\bar{C}) : \bar{C} - e$ è connesso, dunque $\left|E(\bar{C} - e)\right| = \left|E(\bar{C})\right| - 1$, in quanto $\bar{C} - e := (V(\bar{C}), E(\bar{C} \setminus \{e\}))$, questo però comporta che $\left|E(\bar{C} - e)\right| < \left|E(\bar{C})\right|$ il che è un assurdo in quanto và contro la definizione di $\bar{C}$ come sottografo con $\left|E(\bar{C})\right| = \min(S)$, dunque $\bar{C}$ è un albero.

■