



Università degli Studi di Padova
Laboratorio di Informatica Industriale

Corso di Laurea Triennale in Ing. Meccatronica

Assegnamento di Programmazione

Anno Accademico 2021-22

Indice

1	Introduzione all'Assegnamento	2
2	Energia Pulita e Accessibile	2
3	Obiettivo dell'assegnamento	2
4	Importare i dati sul tempo metereologico	2
5	Calcolo dell'output di una turbina eolica	3
6	Modello Turbina Eolica	3
7	Altri Modelli	5
7.1	Velocità del vento all'altezza del mozzo	5
7.1.1	Profilo logaritmico	6
7.1.2	Hellman	7
7.2	Temperatura dell'aria all'altezza del mozzo	7
7.2.1	Gradiente Lineare	7
7.3	Densità dell'aria all'altezza del mozzo	8
7.3.1	Barometrico	8
7.3.2	Gas ideale	8
8	Uscita di potenza	8
8.1	Curva dei coefficienti di potenza	9
8.2	Curva di Potenza	9
9	Ulteriori strumenti	10
9.1	Interpolazione lineare	10
9.2	Interpolazione logaritmica	10
10	A picture is worth a thousand words	10
11	Parco Eolico	11
12	Suggerimenti finali	11

1 Introduzione all'Assegnamento

L'obiettivo di questo progetto finale è farvi applicare tutti i concetti che avete appreso durante il semestre. Questo richiede di proporvi un problema non banale che possa portarvi a discussioni all'interno del gruppo, discussioni che sappiamo essere impegnative ma anche stimolanti. Poiché è probabilmente il vostro primo progetto di queste dimensioni avrete la possibilità di chiedere incontri con il docente o l'assistente con l'obiettivo di verificare i risultati delle vostre discussioni e assicurarvi di procedere nella giusta direzione. Non lasciatevi condizionare dalla lettura iniziale: vogliamo farvi crescere professionalmente, non vogliamo farvi impazzire.

2 Energia Pulita e Accessibile

L'Organizzazione delle Nazioni Unite (ONU) ha definito 17 Obiettivi per lo sviluppo sostenibile - Sustainable Development Goals, SDGs (<https://sdgs.un.org/>).



Tra questi, l'Obiettivo numero 7 - Energia Pulita e Accessibile - vuole assicurare a tutti l'accesso a sistemi di energia economici, affidabili, sostenibili e moderni. L'energia è infatti un elemento centrale per quasi tutte le sfide e le opportunità più importanti che il mondo si trova oggi ad affrontare. Che sia per lavoro, sicurezza, cambiamento climatico, produzione alimentare o aumento dei redditi, l'accesso all'energia è essenziale.

Ci sono diverse forme di energia rinnovabili e diverse sorgenti di energia disponibili. In questo progetto, lavoreremo per sviluppare un software per calcolare l'energia ottenibile da turbine eoliche.

3 Obiettivo dell'assegnamento

In questo progetto dovrete sviluppare il software per l'analisi di turbine eoliche. Per completare con successo l'assegnamento sarà necessario sviluppare le seguenti funzionalità:

1. Importare i dati sul tempo metereologico da un file (Sez. 4).
2. Sviluppare il modello di una turbina eolica (Sez. 6)
3. Calcolare l'output di potenza della turbina a partire dai dati del tempo metereologico (Sez. 8)
4. Stampare o disegnare l'output e le curve di potenza (coefficienti) (Sez. 10)

4 Importare i dati sul tempo metereologico

Per valutare il comportamento di una turbina eolica è necessario fornire i dati sulla velocità del vento per il periodo di tempo che si desidera analizzare. Il vo-

stro software dovrà quindi avere la capacità di importare dei dati metereologici, che sono costituiti da:

- la velocità del vento a due diverse altezze in m/s;
- temperatura dell'aria a due diverse altezze in K;
- la lunghezza della rugosità superficiale in m;
- la pressione dell'aria in Pa.

Nella directory `data` trovare un file `weather.csv` che rappresenta un esempio della struttura che deve avere il file `weather`. La seconda riga indica le due altezze in m a cui si applicano i dati.

5 Calcolo dell'output di una turbina eolica

Per modellare il comportamento di una turbina eolica e determinare la potenza che è in grado di erogare è necessario considerare diversi aspetti che porteranno a prevedere la produzione di energia a partire dagli input delle serie temporali meteorologiche. Le prossime sezioni vi forniranno i dettagli per:

- Modello di turbina eolica (Sez. 6);
- Modelli per il calcolo della temperatura e della densità dell'aria e della velocità del vento all'altezza del mozzo (Sez. 7);
- Modello di uscita di potenza (Sez. 8);

6 Modello Turbina Eolica

La potenza che viene prodotta dipende dalle caratteristiche della turbina eolica che considerate:

1. altezza del mozzo della turbina eolica in m;
2. diametro del rotore in m. Questo dato è necessario se la potenza in uscita viene calcolata utilizzando la curva del coefficiente di potenza;
3. potenza nominale della turbina eolica in W;
4. curva di potenza (Fig. 1);
5. curva dei coefficienti di potenza (Fig. 2).

Questi dati sono disponibili all'interno dell'OpenEnergy Database (oedb). Nel repository trovate i seguenti file già scaricati:

- `turbine_data.csv`
- `power_coefficient_curves.csv`
- `power_curves.csv`

Il vostro programma dovrà essere in grado di ricavare i dati della turbina da questi file. In particolare dal file `power_curves.csv` dovrà ricavare le velocità del vento in m/s e il corrispondente valore della curva di potenza e dal file `power_coefficient_curves.csv` dovrà ricavare le velocità del vento in m/s e il corrispondente valore della curva del coefficiente di potenza. Il file `turbine_data.csv` contiene tutti gli altri parametri necessari alla modellizzazione della turbina.

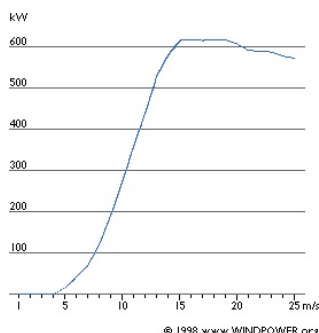


Figura 1: Curva di Potenza

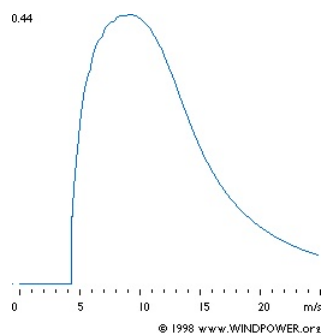


Figura 2: Coefficiente di Potenza

Approfondimento: Curva di Potenza

La curva di potenza di una turbina eolica (Fig. 1) è un grafico che indica l'entità della potenza elettrica prodotta dalla turbina a diverse velocità del vento.

Le curve di potenza vengono rilevate tramite misurazioni sul campo, dove un anemometro viene posizionato su un palo ragionevolmente vicino alla turbina eolica (non sulla turbina stessa o troppo vicino ad essa, poiché il rotore della turbina potrebbe creare turbolenze e rendere inaffidabile la misurazione della velocità del vento). Se la velocità del vento non fluttua troppo rapidamente, si può utilizzare la misura della velocità del vento dall'anemometro e leggere la potenza elettrica in uscita dalla turbina eolica e tracciare i due valori insieme in un grafico come quello in Fig. 1. In realtà, si vedrà uno sciame di punti sparsi intorno alla linea blu e non la curva ordinata del grafico. Il motivo è che in pratica la velocità del vento fluttua sempre e non si può misurare esattamente la colonna di vento che passa attraverso il rotore della turbina. Non è una soluzione praticabile posizionare un anemometro davanti alla turbina, poiché la turbina proietta anche un'"ombra del vento" e frena il vento davanti a sé. In pratica, quindi, si deve fare una media delle diverse misurazioni per ogni velocità del vento e tracciare il grafico attraverso queste medie. Inoltre, è difficile effettuare misurazioni esatte della velocità del vento stesso. Se si ha un errore del 3% nella misurazione della velocità del vento, l'energia del vento può essere superiore o inferiore del 9% perché il contenuto energetico varia con la terza potenza della velocità del vento. Di conseguenza, possono esserci errori fino a più o meno il 10% anche nelle curve di potenza certificate.

Approfondimento: Curva dei coefficienti di potenza

Il coefficiente di potenza indica l'efficienza con cui una turbina converte l'energia del vento in elettricità.

Molto semplicemente, per misurare l'efficienza tecnica di una turbina eolica basta dividere la potenza elettrica in uscita per l'energia eolica in entrata. In altre parole, prendiamo la curva di potenza e la dividiamo per l'area del rotore per ottenere la potenza in uscita per metro quadro di area del rotore. Per ogni velocità del vento, dividiamo il risultato per la quantità di potenza del vento per metro quadro. Il grafico in Fig. 2 mostra la curva del coefficiente di potenza di una tipica turbina eolica. Sebbene l'efficienza media di queste turbine sia leggermente superiore al 20%, l'efficienza varia molto con la velocità del vento. Se ci sono piccole pieghe nella curva, di solito sono dovute a errori di misurazione. Come si può vedere, l'efficienza meccanica della turbina è massima (in questo caso il 44%) a una velocità del vento di circa 9 m/s. Questa è una scelta deliberata degli ingegneri che hanno progettato la turbina. A basse velocità del vento l'efficienza non è così importante, perché non c'è molta energia da raccogliere. Alle alte velocità del vento, la turbina deve sprecare l'energia in eccesso rispetto a quella per cui il generatore è stato progettato. L'efficienza è quindi più importante nella regione di velocità del vento in cui si trova la maggior parte dell'energia. Una maggiore efficienza tecnica non è necessariamente la strada da percorrere. Non è un obiettivo in sé avere un'elevata efficienza tecnica di una turbina eolica. Ciò che conta, in realtà, è il costo per estrarre chilowattora dal vento nei prossimi 20 anni. Poiché il combustibile è gratuito, non c'è bisogno di risparmiarlo. La turbina ottimale non è quindi necessariamente quella con la maggiore produzione di energia all'anno. D'altra parte, ogni metro quadrato di superficie del rotore costa, quindi è ovviamente necessario raccogliere tutta l'energia possibile, purché si riesca a contenere i costi per chilowattora.

7 Altri Modelli

Per calcolare la potenza in uscita dalla turbina è necessario sviluppare i seguenti modelli:

1. Modello per il calcolo della velocità del vento all'altezza del mozzo (Sez. 7.1);
2. Modello per il calcolo della temperatura dell'aria all'altezza del mozzo (Sez. 7.2);
3. Modello della densità dell'aria all'altezza del mozzo (Sez. 7.3).

7.1 Velocità del vento all'altezza del mozzo

Per calcolare la velocità del vento all'altezza del mozzo della turbina si può utilizzare uno dei seguenti metodi:

- profilo logaritmico (Sez. 7.1.1)

Tipologia di terreno	Rugosità (m)
Superfici d'acqua, neve o sabbia	0.0001
Spazi aperti, terreno piano, erba tagliata o terreno nudo	0.01
Terreni coltivati con vegetazione	0.05
Periferie, città, foreste, aree con molti alberi e cespugli	0.3

Tabella 1: valori del coefficiente di rugosità in funzione del tipo di terreno

- hellman (Sez. 7.1.2)
- interpolazione lineare (Sez. 9.1)
- interpolazione logaritmica (Sez. 9.2)

7.1.1 Profilo logaritmico

Questo metodo calcola la velocità del vento all'altezza del mozzo utilizzando un profilo del vento logaritmico.

Viene utilizzata l'equazione dell'altezza logaritmica. È possibile includere nel calcolo l'altezza degli ostacoli circostanti. I parametri sono la serie temporale della velocità del vento (serie di dati) e l'altezza alla quale la velocità è stata rilevata. Inoltre è necessario conoscere l'altezza del mozzo della turbina eolica e l'altezza degli ostacoli nell'area circostante la turbina eolica, quest'ultima, se gli ostacoli sono molto estesi è posta a 0. Ultimo parametro è la lunghezza della rugosità del sito.

La lunghezza di rugosità viene stimata in base al tipo di terreno fra la turbina e il punto di misura e, mediamente, il valore che può assumere ricade nell'intervallo fra 1/10 e 1/30 dell'altezza media degli elementi di rugosità del terreno. Nel file `weather.csv` trovate il valore della rugosità.

A partire da questi dati il metodo restituisce la velocità del vento all'altezza del mozzo:

$$v_{vento,mozzo} = v_{vento,dati} \cdot \frac{\ln\left(\frac{h_{mozzo}-d}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_{dati}-d}{z_0}\right)} \quad (1)$$

con: v : velocità del vento, h : altezza, z_0 : lunghezza della rugosità, d : offset dello strato limite (stimato da $d = 0,7 \times altezza_ostacolo$)

Per $d = 0$ risulta la seguente equazione:

$$v_{vento,mozzo} = v_{vento,dati} \cdot \frac{\ln\left(\frac{h_{mozzo}}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_{dati}}{z_0}\right)} \quad (2)$$

con: h_{dati} è l'altezza a cui viene misurata la velocità del vento $v_{vento,dati}$ e $v_{vento,mozzo}$ è la velocità del vento all'altezza del mozzo h_{hub} della turbina eolica.

I parametri di altezza alla quale viene rilevata la velocità del vento, l'altezza del mozzo, l'altezza degli ostacoli e la lunghezza della rugosità devono essere espressi nella stessa unità di misura.

7.1.2 Hellman

Questo metodo calcola la velocità del vento all'altezza del mozzo utilizzando l'equazione di Hellman. I parametri sono simili a quelli del metodo precedente e la velocità del vento al mozzo è calcolato con la seguente equazione:

$$v_{vento,mozzo} = v_{vento,dati} \cdot \left(\frac{h_{mozzo}}{h_{dati}} \right)^\alpha \quad (3)$$

con: v : velocità del vento, h : altezza, α : esponente di Hellman h_{dati} è l'altezza in cui viene misurata la velocità del vento $v_{vento,dati}$ e $v_{vento,mozzo}$ è la velocità del vento all'altezza h_{mozzo} della turbina eolica.

Per l'esponente di Hellman α molti studi utilizzano un valore di 1/7 per l'onshore e un valore di 1/9 per l'offshore. L'esponente di Hellman può anche essere calcolato con la seguente equazione:

$$\alpha = \frac{1}{\ln \left(\frac{h_{mozzo}}{z_0} \right)} \quad (4)$$

con: z_0 : lunghezza della rugosità

Come precedentemente, i parametri di altezza alla quale viene rilevata la velocità del vento, l'altezza del mozzo, l'altezza degli ostacoli e la lunghezza della rugosità devono essere espressi nella stessa unità di misura.

7.2 Temperatura dell'aria all'altezza del mozzo

Per calcolare la temperatura dell'aria all'altezza del mozzo possono essere utilizzati due metodi:

- gradiente lineare (Sez. 7.2.1);
- interpolazione lineare (Sez. 9.1).

7.2.1 Gradiente Lineare

Questo metodo calcola la temperatura all'altezza del mozzo utilizzando un gradiente lineare.

Si assume un gradiente di temperatura lineare di $-6,5$ K/km. I parametri necessari sono una serie di temperature dell'aria in K e l'altezza in m alla quale sono state lette le temperature. Inoltre l'altezza del mozzo della turbina eolica in m.

Per calcolarlo viene utilizzata la seguente equazione:

$$T_{mozzo} = T_{aria} - 0.0065 \cdot (h_{mozzo} - h_{T,dati}) \quad (5)$$

con: T : temperatura [K], h : altezza [m] $h_{T,dati}$ è l'altezza in cui viene misurata la temperatura T_{aria} e T_{mozzo} è la temperatura all'altezza del mozzo h_{mozzo} della turbina eolica.

7.3 Densità dell'aria all'altezza del mozzo

La densità dell'aria all'altezza del mozzo può essere calcolata in tre diversi modi.

- barometrico (Sez. 7.3.1)
- gas ideale (Sez. 7.3.2)
- interpolazione lineare (Sez. 9.1)

7.3.1 Barometrico

Calcola la densità dell'aria all'altezza del mozzo utilizzando l'equazione dell'altezza barometrica. I parametri in ingresso sono la serie dei tempi della pressione atmosferica in Pa e l'altezza in m alla quale viene misurata la pressione atmosferica. Come prima l'altezza del mozzo della turbina in m e, infine la temperatura dell'aria all'altezza del mozzo espressa in K.

La densità dell'aria all'altezza del mozzo è espressa in kg/m³ e viene calcolata con la seguente equazione:

$$\rho_{mozzo} = \left(p/100 - (h_{mozzo} - h_{p,dati}) \cdot \frac{1}{8} \right) \cdot \frac{\rho_0 T_0 \cdot 100}{p_0 T_{mozzo}} \quad (6)$$

con: T : temperatura [K], h : altezza [m], ρ : densità [kg/m³], p : pressione [Pa], $h_{p,dati}$ è l'altezza della misura dei dati del modello per la pressione, p_0 la pressione dell'aria ambientale, ρ_0 la densità ambientale dell'aria, T_0 la temperatura dell'ambiente e T_{mozzo} la temperatura all'altezza del mozzo h_{mozzo} .

Assunzioni:

Gradiente di pressione di $-1/8$ hPa/m

7.3.2 Gas ideale

Calcola la densità dell'aria all'altezza del mozzo utilizzando l'equazione dei gas ideali.

I parametri sono gli stessi del barometrico ma viene utilizzata la seguente equazione:

$$\rho_{mozzo} = p_{mozzo} / (R_s T_{mozzo}) \quad (7)$$

e

$$p_{mozzo} = \left(p/100 - (h_{hub} - h_{p,data}) \cdot \frac{1}{8} \right) \cdot 100 \quad (8)$$

con: T : temperatura [K], ρ : densità [kg/m³], p : pressione [Pa], $h_{p,dati}$ è l'altezza della misura o dei dati del modello per la pressione, R_s è la costante specifica dei gas dell'aria secca (287,058 J/(kg * K)) e p_{mozzo} è la pressione all'altezza del mozzo h_{mozzo} .

8 Uscita di potenza

Dovrà essere possibile scegliere di calcolare la potenza di uscita di una turbina selezionando uno dei metodi successivi:

- curva del coefficiente di potenza (Sez. 8.1)

- curva di potenza (Sez. 8.2)
- usando una curva di densità corretta (work in progress)

8.1 Curva dei coefficienti di potenza

Questo metodo calcola la potenza di uscita della turbina utilizzando una curva del coefficiente di potenza. I parametri in ingresso sono:

- la serie di dati sulla velocità del vento all'altezza del mozzo in m/s;
- i valori della curva dei coefficienti di potenza (velocità del vento e corrispondenti coefficienti di potenza);
- diametro del rotore in m;
- densità dell'aria all'altezza del mozzo in kg/m³.

La potenza elettrica prodotta dalla turbina eolica in W viene calcolata utilizzando la seguente equazione:

$$P = \frac{1}{8} \cdot \rho_{mozzo} \cdot d_{rotore}^2 \cdot \pi \cdot v_{vento}^3 \cdot cp(v_{vento}) \quad (9)$$

con:

- P : potenza [W] (output);
- ρ : densità [kg/m³],
- d : diametro [m],
- v : velocità del vento [m/s],
- cp : coefficiente di potenza.

Si assume che la potenza in uscita sia pari a zero per velocità del vento superiori alla massima e inferiori alla minima indicate nella curva del coefficiente di potenza.

8.2 Curva di Potenza

Calcola la potenza di uscita della turbina utilizzando una curva di potenza.

I parametri utilizzati sono la velocità del vento all'altezza del mozzo in m/s, la velocità del vento in m/s per le quali i valori della curva di potenza sono forniti e i valori della curva di potenza corrispondenti.

Questo metodo restituisce in uscita la potenza elettrica in W. Si presume che la potenza in uscita sia pari a zero per velocità del vento superiori alla massima e inferiori alla minima indicate nella curva di potenza.

9 Ulteriori strumenti

9.1 Interpolazione lineare

Questa funzione può essere utilizzata per l'inter-/estrapolazione lineare di un parametro (ad esempio, la velocità del vento) disponibile a due o più altezze diverse, per approssimare il valore all'altezza del mozzo.

I dati sono le diverse altezze per cui il parametro è disponibile. Se vengono fornite più di due altezze, vengono utilizzate le due più vicine. Data una altezza per la quale si vuole approssimare il parametro (ad esempio, altezza del mozzo) restituisce il risultato dell'inter-/estrapolazione (ad esempio, velocità del vento all'altezza del mozzo).

Per l'interpolazione e l'estrapolazione si utilizza la seguente equazione:

$$f(x) = \frac{(f(x_2) - f(x_1))}{(x_2 - x_1)} \cdot (x - x_1) + f(x_1) \quad (10)$$

9.2 Interpolazione logaritmica

Inter- o estrapolazione logaritmica tra i valori di un data frame.

Questa funzione può essere utilizzata per l'inter-/estrapolazione logaritmica della velocità del vento se è disponibile a due o più altezze diverse, per approssimare il valore all'altezza del mozzo.

I dati sono le diverse altezze per cui il parametro è disponibile. Se vengono fornite più di due altezze, vengono utilizzate le due più vicine. Data una altezza per la quale si vuole approssimare il parametro (ad esempio, altezza del mozzo) restituisce il risultato dell'inter-/estrapolazione (ad esempio, velocità del vento all'altezza del mozzo).

Per l'inter- ed estrapolazione logaritmica si utilizza la seguente equazione [1]:

$$f(x) = \frac{\ln(x) \cdot (f(x_2) - f(x_1)) - f(x_2) \cdot \ln(x_1) + f(x_1) \cdot \ln(x_2)}{\ln(x_2) - \ln(x_1)} \quad (11)$$

10 A picture is worth a thousand words

Al fine di fornire all'utilizzare del vostro programma una informazione più semplice da comprendere può essere utile sviluppare un ulteriore strumento che permetta la visualizzazione dei dati ricevuti in ingresso e prodotti dal vostro software.

Un primo strumento dovrebbe leggere i file che riguardano le curve di potenza e i coefficienti di potenza e fornisca una loro visualizzazione in più grafici o condensandoli in uno solo (Fig. 3).

Un ulteriore grafico che può essere molto utile è un grafico che permetta di visualizzare e comparare il comportamento di diverse turbine eoliche a parità di condizioni meteorologiche. Un grafico del genere avrà in ascisse il tempo e nelle ordinate la potenza in W.

Una possibilità è utilizzare la libreria gnuplot (<http://gnuplot.sourceforge.net/>) o scrivendo uno script o integrando le chiamate direttamente nel vostro

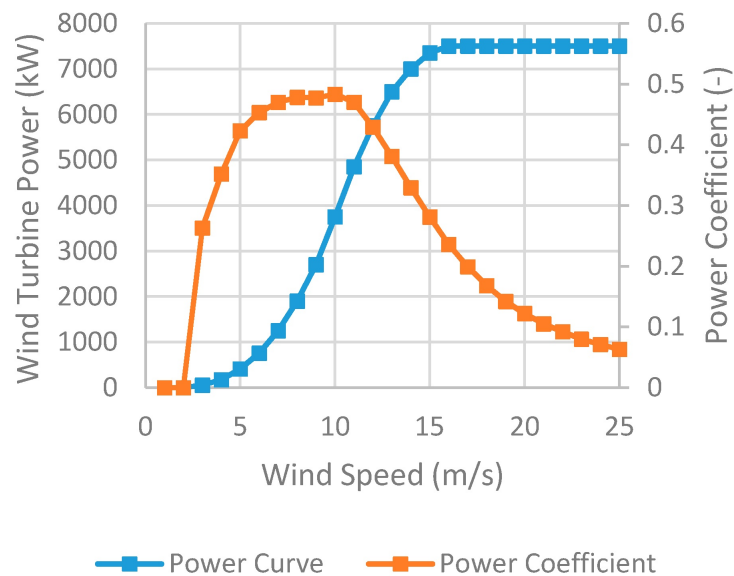


Figura 3: Grafico delle curve di potenza e dei coefficienti

programma per produrre un disegno che abbia nell'asse delle ascisse il tempo e nelle ordinate la potenza in W.

11 Parco Eolico

Una volta che avete costruito un sistema per modellare e comparare il comportamento di una turbina eolica, potete considerare la possibilità di estendere il vostro lavoro per modellare il comportamento di un parco eolico composto da diverse turbine di modelli diversi.

12 Suggerimenti finali

Nello svolgimento di questo assegnamento dovete utilizzare tutti gli strumenti che abbiamo visto a lezione, facendo attenzione allo stile di programmazione, al testing, a non avere problemi nella gestione della memoria dinamica, a rendere adeguatamente modulare il programma, ... Non è necessario completare tutti i punti dell'assegnamento per superare l'esame, potete infatti fermarvi prima se i vincoli temporali, anche legati al sostenere gli altri esami, vi impediscono di fare di più. E' invece necessario utilizzare un approccio maturo allo sviluppo del vostro software evitando di procedere per tentativi. Nello sviluppo dell'assegnamento siete chiamati a fare diversi commit in modo che sia possibile tracciare il contributo del vostro lavoro e anche gli sforzi che avete fatto per arrivare al risultato che consegnate. Non saranno accettati assegnamenti con pochi commit perché diventa impossibile valutare le vostre attività. Non è stata definita una data di consegna. Nel momento in cui volete consegnare, smettete di committare e comunicatemi l'avvenuto completamento con una email. Nella stessa indicate alcune possibili date per l'incontro di valutazione finale.