

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

Progettazione e dimensionamento dei componenti di una velobike

ELABORATO FINALE IN TECNICA DELLE COSTRUZIONI MECCANICHE

CANDIDATO
Fabio Beltrandi

RELATORE:
Prof.Ing. Giangiacomo Minak

Anno Accademico 2024-2025

*And I was thinkin' to myself
"This could be Heaven or
this could be Hell"
Eagles in Hotel California*

Glossario

1	Introduzione.....	1
2	Motori elettrici.....	4
2.1	Motori nel mozzo anteriore.....	5
2.2	Motori centrali a pedivella.....	5
2.3	Motori nel mozzo posteriore.....	7
3	Normative sulla circolazione.....	8
4	Batteria e motore elettrico.....	11
4.1	Batteria e motore.....	14
4.2	Capacità, autonomia e compromessi progettuali.....	14
4.3	Autoscarica.....	14
4.4	Effetto memoria.....	15
5	Motore elettrico: descrizione e scelta.....	16
6	Scelta e dimensionamento batteria.....	20
7	Ricarica Solare.....	22
7.1	Scelta del pannello fotovoltaico.....	27
8	Regolatore di carica e massimizzazione della conversione dell'energia solare.....	29
8.1	Regolatore di carica: un dispositivo indispensabile per salvare la batteria.....	29
8.2	Il regolatore di carica scelto con la sua scheda tecnica.....	32
9	Assemblaggio della parte elettrica.....	33
10	Parte meccanica per la trasmissione del moto.....	34
10.1	Scelta del pacco pignoni posteriore e della catena.....	37
11	Montaggio dei componenti.....	38
12	Conclusioni.....	39
13	Ringraziamenti.....	40

1 Introduzione [1] [2]

Negli ultimi anni la mobilità sostenibile ha acquisito un ruolo sempre più centrale, spinta dalla crescente sensibilità verso le tematiche ambientali e dalla necessità di ridurre le emissioni inquinanti. Tra le soluzioni emergenti, le biciclette elettriche a pedalata assistita rappresentano un'alternativa versatile e intelligente ai tradizionali mezzi di trasporto, specialmente nei contesti urbani. Questi veicoli, dotati di motori elettrici che supportano lo sforzo del ciclista durante la pedalata, uniscono efficienza, praticità e sostenibilità, conquistando una fascia d'utenza sempre più ampia. Secondo recenti statistiche, il mercato delle e-bike è in costante crescita: in Europa, ad esempio, si è passati da 3,7 milioni di unità vendute nel 2019 a un incremento del 44% solo l'anno successivo, con stime che indicano oltre 17 milioni di vendite annue entro il 2030. A favorire questo successo contribuiscono diversi fattori: la promozione di stili di vita più salutari, lo sviluppo di infrastrutture ciclabili, l'intermodalità con i trasporti pubblici e la capacità delle e-bike di rispondere alle esigenze di diverse categorie di utenti — dal pendolare allo studente, dal cicloturista fino a chi presenta difficoltà motorie. Questa tesi si propone di convertire il prototipo di bicicletta Esmilia1 in una versione a pedalata assistita dotata di ricarica solare autonoma, unendo così le potenzialità dell'elettrificazione con quelle dell'energia rinnovabile. L'obiettivo è duplice: da un lato ridurre ulteriormente la dipendenza da fonti energetiche tradizionali, dall'altro potenziare l'autonomia e la versatilità del veicolo. Ad oggi, l'integrazione tra pannelli fotovoltaici e biciclette elettriche è ancora un campo sperimentale. Le soluzioni attualmente esistenti sono quasi esclusivamente di tipo DIY (do-it-yourself), realizzate da appassionati e maker, data l'assenza di proposte commerciali mature. Questi sistemi si dividono in due principali categorie: quelli che applicano pannelli solari convenzionali direttamente sulla bicicletta, e quelli che prevedono l'integrazione dei pannelli nel telaio stesso. Quest'ultima strada, pur essendo più elegante dal punto di vista progettuale, comporta compromessi significativi in termini di produzione energetica, a causa della ridotta superficie disponibile e dell'orientamento spesso subottimale dei moduli solari. Nel nostro progetto, l'energia solare raccolta viene accumulata in una batteria, la quale alimenta un motore elettrico incaricato di fornire assistenza alla pedalata. Per affrontare le criticità emerse da studi precedenti — tra cui la bassa efficienza di conversione e la limitata capacità di ricarica in movimento — è stata posta particolare attenzione alla scelta dei componenti, prediligendo soluzioni di alta qualità e tecnologie avanzate, al fine di massimizzare l'efficienza del sistema e garantire una reale utilità dell'assistenza solare. Viene posto anche un occhio di riguardo

all'aereodinamica. È infatti importante che la bicicletta sia il quanto più aereodinamica possibile al fine di ridurre l'attrito con l'aria e, in questo modo, aumentare l'autonomia.



Figura 1 Velobike

2 Motori elettrici

Le biciclette a pedalata assistita rappresentano una delle innovazioni più significative nel campo della mobilità sostenibile. Alla base del loro funzionamento vi è un motore elettrico che supporta la pedalata del ciclista, riducendo lo sforzo richiesto e rendendo più accessibili tragitti lunghi o impegnativi. I sistemi di assistenza elettrica si distinguono principalmente per la posizione del motore, e questa caratteristica influenza in maniera rilevante prestazioni, maneggevolezza e costi di installazione e manutenzione.

Tipologie di motore

I motori installabili su biciclette elettriche si suddividono in tre categorie principali:

1. Motori nel mozzo anteriore
2. Motori nel mozzo posteriore
3. Motori centrali (o a pedivella)

2.1 Motori nel mozzo anteriore

Questi motori sono montati direttamente sulla ruota anteriore e forniscono assistenza alla pedalata facendo ruotare la ruota stessa. Si tratta della soluzione tecnicamente più semplice ed economicamente più accessibile. Il principale vantaggio di questa configurazione è la facilità di installazione: il motore è indipendente dalla trasmissione meccanica della bicicletta, non richiede modifiche strutturali e la sua manutenzione è minima. Tuttavia, presenta alcune limitazioni. Essendo montato su una ruota che solitamente sopporta meno carico, può generare instabilità in condizioni di scarsa aderenza, come su fondo bagnato o sterrato. Inoltre, può sovraccaricare la forcella anteriore, che spesso non è progettata per sopportare sollecitazioni aggiuntive, soprattutto nei modelli convertiti da biciclette tradizionali. Per queste ragioni, il motore anteriore è indicato per usi occasionali o in ambiti urbani su terreni prevalentemente pianeggianti.

2.2 Motori centrali (a pedivella)

I motori centrali rappresentano la scelta più avanzata dal punto di vista tecnologico. Sono posizionati in corrispondenza del movimento centrale della bicicletta e trasferiscono potenza

direttamente alla guarnitura, amplificando la forza esercitata dal ciclista sui pedali. Questa tipologia di motore è particolarmente efficiente poiché sfrutta al meglio le marce della bicicletta, garantendo prestazioni elevate anche in salita. Un ulteriore vantaggio è il posizionamento centrale e basso del motore, che migliora il bilanciamento complessivo del mezzo e abbassa il baricentro, rendendolo più stabile e maneggevole. I motori centrali possono essere suddivisi in due sottogruppi: quelli integrati nel telaio, presenti sulle biciclette progettate appositamente per essere elettriche, e quelli aggiunti successivamente tramite kit di conversione, adatti a trasformare bici tradizionali. Mentre la prima soluzione offre un'estetica più pulita e una struttura più robusta, la seconda richiede l'aggiunta di supporti e staffe per il corretto montaggio, aumentando la complessità dell'intervento. Tuttavia, l'elevata coppia erogata da questi motori comporta una maggiore usura delle componenti meccaniche, in particolare della trasmissione. Inoltre, il costo di acquisto e installazione risulta più elevato rispetto alle altre soluzioni. Per queste ragioni, i motori centrali si trovano principalmente su biciclette di fascia alta, dedicate a chi cerca prestazioni superiori e massima integrazione tra componente meccanica ed elettrica.



Figura 2 Motore centrale

2.3 Motori nel mozzo posteriore

Questa configurazione prevede l'installazione del motore sulla ruota posteriore. Rispetto alla versione anteriore, offre una maggiore efficienza e una sensazione di guida più dinamica, grazie all'integrazione diretta con il sistema di trasmissione. Il motore posteriore migliora la trazione, soprattutto in salita, dove la spinta applicata sul retro del mezzo contribuisce alla stabilità generale. Tuttavia, se la batteria è anch'essa collocata nella parte posteriore, il baricentro della bicicletta potrebbe risultare troppo sbilanciato, influenzando negativamente la maneggevolezza. Inoltre, la maggiore complessità strutturale richiede spesso piccoli adattamenti al telaio e rende più frequente la manutenzione di catena e cambio, poiché il motore esercita una forza diretta sulla trasmissione meccanica. Nonostante ciò, questa è la soluzione più diffusa sul mercato grazie all'equilibrio tra prestazioni e costi.



Figura 3 Motore posteriore

3 Normative sulla circolazione [4]

Nel panorama attuale della mobilità sostenibile, le biciclette elettriche stanno assumendo un ruolo sempre più rilevante. In particolare, la loro diffusione ha spinto le autorità a definire con precisione il quadro normativo che ne regola la circolazione. In Italia, per guidare una bicicletta elettrica non è necessario essere in possesso di una patente o di un'apposita licenza: non è richiesto alcun corso, né un patentino specifico. Tuttavia, è fondamentale distinguere con chiarezza tra biciclette elettriche e biciclette a pedalata assistita, in quanto la normativa è differente a seconda della tipologia del mezzo. La legislazione italiana, in particolare attraverso il Codice della Strada, individua nella bicicletta a pedalata assistita un veicolo assimilabile a una bicicletta tradizionale, a patto che rispetti specifici requisiti tecnici. Secondo quanto stabilito, questi veicoli devono essere dotati di un motore elettrico ausiliario con potenza nominale continua massima di 250 watt (0,25 kW). Tale motore deve entrare in funzione esclusivamente a supporto della pedalata, e la sua erogazione di potenza deve diminuire progressivamente fino a cessare del tutto quando la bicicletta raggiunge la velocità di 25 km/h, oppure nel momento in cui il ciclista smette di pedalare. Queste condizioni sono fondamentali per far rientrare il mezzo nella definizione di "velocipede", così come previsto dall'articolo 50 del Codice della Strada, che lo regola come un veicolo a propulsione muscolare e, solo in parte, assistito elettricamente. Lo stesso articolo recita:

"I velocipedi sono i veicoli con due o più ruote funzionanti a propulsione esclusivamente muscolare, per mezzo di pedali o di analoghi dispositivi, azionati dalle persone che si trovano sul veicolo; sono altresì considerati velocipedi le biciclette a pedalata assistita, dotate di un motore ausiliario elettrico avente potenza nominale continua massima di 0,25 kW (o 0,5 kW se adibiti al trasporto di merci), la cui alimentazione è progressivamente ridotta ed infine interrotta quando il veicolo raggiunge i 25 km/h o prima se il ciclista smette di pedalare. I velocipedi a pedalata assistita possono essere dotati di un pulsante che permetta di attivare il motore anche a pedali fermi, purché con questa modalità il veicolo non superi i 6 km/h."

Questo tipo di regolamentazione consente di considerare le e-bike a pedalata assistita alla stregua delle biciclette tradizionali, con la conseguenza che non sono soggette a immatricolazione, assicurazione, casco obbligatorio o limitazioni particolari alla circolazione, se non quelle comuni a tutti i velocipedi. Tuttavia, è importante notare che molti modelli di biciclette a pedalata assistita risultano sovradimensionati rispetto ai limiti imposti dalla legge. Infatti, intervenendo sull'elettronica del mezzo e rimuovendo i limitatori di velocità preimpostati, è possibile raggiungere con facilità velocità che superano i 50 km/h, trasformando la bicicletta in un veicolo più simile a un ciclomotore. In questi casi, però, la bicicletta non può più essere considerata un velocipede e

va incontro a una regolamentazione completamente diversa, che include l'obbligo di targa, assicurazione, casco e spesso anche il divieto di circolare su piste ciclabili. Un altro aspetto fondamentale è quello relativo alle dimensioni massime consentite per i velocipedi. Sempre l'articolo 50 del Codice della Strada, al comma 2, stabilisce con precisione i limiti fisici entro i quali un mezzo può essere considerato a tutti gli effetti una bicicletta:

"I velocipedi non possono superare 1,30 metri di larghezza, 3,5 metri di lunghezza e 2,20 metri di altezza."

Oltre a questi parametri tecnici, il legislatore ha posto particolare attenzione alla sicurezza d'uso. Un elemento centrale da questo punto di vista è il sensore di pedalata, componente elettronico obbligatorio su tutte le biciclette a pedalata assistita. Questo dispositivo ha la funzione di verificare se il ciclista stia effettivamente pedalando, e in base a questo attiva o disattiva il motore. In assenza di pedalata, il motore non può in alcun modo rimanere acceso. Tale vincolo è dettato da considerazioni di sicurezza: ad esempio, se ci si trovasse in discesa o in curva e il motore continuasse a fornire potenza senza alcun controllo, la conduzione del mezzo potrebbe diventare pericolosa e imprevedibile. La presenza del sensore garantisce dunque che l'assistenza elettrica sia sempre subordinata all'azione diretta del ciclista.

I sensori di pedalata si dividono principalmente in due categorie:

1. Sensori di rotazione: rilevano semplicemente se i pedali stanno girando, indipendentemente dallo sforzo esercitato;
2. Sensori di coppia: più avanzati, misurano l'effettiva forza applicata dal ciclista sui pedali, e modulano l'intervento del motore in maniera proporzionale.

Questa distinzione è importante anche per comprendere le diverse esperienze di guida offerte dai vari modelli di e-bike: i sensori di coppia, ad esempio, garantiscono un comportamento del mezzo più naturale e progressivo. Infine, è fondamentale ribadire che una bicicletta a pedalata assistita è cosa diversa da un veicolo elettrico a due ruote che si muove indipendentemente dalla pedalata (come ad esempio un monopattino elettrico o uno scooter). Questi ultimi, infatti, sono soggetti a normative differenti, ben più restrittive, che li assimilano a ciclomotori o motocicli.

4 Batteria e motore elettrico [5] [6]

Tra i componenti fondamentali di una bicicletta a pedalata assistita, la batteria ricopre senza dubbio un ruolo primario, al pari del motore. Essa rappresenta il serbatoio energetico dell'intero sistema: immagazzina energia elettrica e la rende disponibile al motore, che la converte in energia meccanica, consentendo al ciclista di affrontare tragitti anche impegnativi con uno sforzo ridotto. In commercio esistono numerose tipologie di batterie, distinte principalmente per composizione chimica e per ambito d'utilizzo. Di seguito sono descritte le principali:

1 Le batterie per bici elettriche ai polimeri di litio (Li-Poly):

Questa tipologia, derivata dalle batterie agli ioni di litio, presenta una struttura più flessibile e leggera, ma al contempo risulta meno resistente agli urti e alle sollecitazioni meccaniche. Il costo di produzione più elevato e una durata tendenzialmente inferiore ne limitano la diffusione, rendendole meno competitive rispetto alle più diffuse batterie Li-Ion. Sono leggere e di forma adattabile, ma hanno una minore durata, costi elevati e un'alta fragilità meccanica.



Figura 4 Batteria al Litio

2 Le batterie per biciclette elettriche all'idruro metallico di nichel (Ni-MH):

Un tempo largamente utilizzate, oggi sono considerate superate. Pur offrendo una maggiore sicurezza ambientale rispetto alle batterie al nichel-cadmio, mostrano limiti in termini di compatibilità con sistemi moderni e una densità energetica

inferiore. Sono meno inquinanti delle batterie Ni-Cd, ma hanno una compatibilità limitata, bassa capacità e vedono l'effetto memoria che verrà approfondito in seguito



Figura 5 Batteria al Nichel

3 Le batterie per e-bike al nichel-cadmio (Ni-Cd):

Ormai quasi completamente abbandonate, le batterie Ni-Cd sono state vietate all'interno dell'Unione Europea a causa della tossicità del cadmio. Presentavano problemi di inquinamento ambientale e subivano in maniera marcata l'effetto memoria.

4 Batterie per le bici elettriche al piombo:

Sono le batterie di più vecchia concezione e oggi risultano del tutto inadatte all'utilizzo su biciclette elettriche. Il peso elevato e i lunghi tempi di ricarica ne compromettono l'efficienza e la praticità d'uso. Il loro impiego è ormai residuale.



Figura 6 Batteria al Piombo

5 Batterie per le bici elettriche al gel:

Possono essere rischiose in situazioni di terreni montuosi o difficili e possono distruggersi se la tensione di carica non è selezionata correttamente.

4.1 Batteria e motore

Nel contesto delle biciclette a pedalata assistita, la batteria rappresenta il vero e proprio serbatoio di energia elettrica, ed è fondamentale che essa sia perfettamente compatibile con il motore a cui è abbinata. Il primo parametro da considerare è la **tensione di lavoro**, ovvero la differenza di potenziale tra catodo (polo positivo) e anodo (polo negativo). Per garantire il corretto funzionamento del sistema, la tensione nominale della batteria deve coincidere con quella prevista per il motore. Le configurazioni più comuni in commercio sono da 36 V e 48 V, selezionate in base al tipo di utilizzo e alla potenza richiesta dal veicolo.

4.2 Capacità, autonomia e compromessi progettuali

Accanto alla tensione, un altro parametro cruciale è la capacità della batteria, espressa in ampere-ora (Ah). Questo valore rappresenta la quantità di carica elettrica che la batteria è in grado di immagazzinare, e influisce direttamente sull'autonomia della bicicletta: una maggiore capacità garantisce percorrenze più lunghe con una singola carica. Tuttavia, questa scelta non è priva di compromessi. All'aumentare della capacità corrisponde inevitabilmente un aumento di peso, poiché è necessario impiegare più materiale attivo e celle più voluminose. Questo incremento di massa si traduce in una maggiore resistenza al moto, che il motore deve compensare con uno sforzo superiore. Di conseguenza, una batteria più pesante può paradossalmente ridurre l'autonomia complessiva, in quanto richiede un maggior consumo di energia per muovere il mezzo.

4.3 Autoscarica

Un ulteriore aspetto da non sottovalutare è il fenomeno dell'autoscarica, ovvero la progressiva perdita di carica della batteria anche in assenza di utilizzo. Questo processo, se prolungato nel tempo, può condurre a due effetti critici:

1. Deformazione degli elementi interni, causata dalla disgregazione della struttura chimica;
2. Attivazione dei circuiti di protezione, progettati per salvaguardare la batteria da scariche eccessive, che però possono bloccare definitivamente il funzionamento.

In entrambi i casi, la batteria può diventare inutilizzabile anche se non è mai stata effettivamente impiegata, con conseguente necessità di sostituzione.

4.4 L'effetto memoria

Tra i fenomeni di deterioramento precoce più noti vi è il cosiddetto effetto memoria, particolarmente diffuso nelle batterie al nichel-cadmio (Ni-Cd) e, in misura minore, in quelle al nichel-metallo idruro (Ni-MH). Questo fenomeno si manifesta quando la batteria viene ricaricata senza essere completamente scaricata, e può avvenire secondo due modalità:

1 Formazione di cristalli nella batteria (batteria Ni-Cd). Quando una batteria al nichel si scarica, al suo interno si vengono a formare dei microcristalli di cadmio. Durante il successivo ciclo, se la batteria non è completamente scarica, si vengono a formare dei cristalli più grossi nelle aree non scariche. Ora, poiché la superficie totale dei cristalli più grandi è inferiore a quella dei cristalli più piccoli della stessa massa, quando si scaricano reagiscono in modo peggiore e si verifica un calo di tensione.

2 Ricristallizzazione dell'elettrodo cadmio: le tecnologie di ricarica da noi utilizzate non hanno la possibilità di tenere conto dello stato della batteria, ma vanno a sovraccaricare una batteria parzialmente scarica. Questo provoca una ricristallizzazione dell'elettrodo cadmio. A causa della posizione del cadmio all'interno della serie di tensioni elettrochimiche, la ricristallizzazione è associata ad una tensione di uscita inferiore e, pertanto, ad una capacità ridotta.

Risultano invece immuni da questo fenomeno le batterie al litio. Questo è uno dei principali motivi che ha portato ad una così grande diffusione di questa tipologia di batteria.

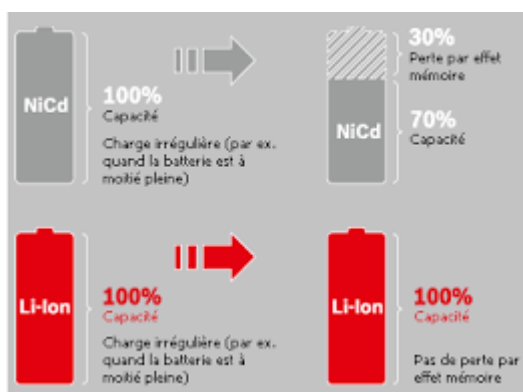


Figura 7 Effetto memoria

Motore elettrico: descrizione e scelta.

Per poter far in modo di scegliere correttamente il motore elettrico e la batteria, risulta fondamentale scegliere l'uno in funzione dell'altro. Vi sono infatti delle specifiche grandezze a cui stare attenti e sulle quali andremo a basare la nostra scelta:

1 Potenza nominale: la possiamo identificare come la massima potenza che un motore elettrico è in grado di sprigionare in equilibrio termico. Come temperatura di riferimento, solitamente, si prendono venti gradi centigradi.

2 Potenza di picco: indica la potenza massima che un motore è in grado di erogare. Solitamente viene controllata tramite software in base a come vengono costruiti gli ingranaggi e il pacco batterie. Di solito si fa in modo che la potenza di picco erogata sia facilmente sostenibile dagli organi meccanici al fine di non incappare in rotture.

Essendo entrambe misura di una potenza, la loro unità di misura è il watt [W]. Per trovare la potenza di picco dovrò andare a fare il prodotto della tensione della batteria [V] con la corrente elettrica del controller del nostro motore [A]. Per il nostro studio andremo ad utilizzare un motore Shimano alimentato con una tensione di 36V a 15A. Questo ci torna subito utile per andare a scegliere la tensione della batteria che sarà la medesima del motore per i motivi precedentemente citati.



Figura 8 Motore elettrico scelto

Questi dati ci portano ad avere una potenza di picco di $36 \times 15 = 540\text{W}$. Possiamo quindi avere dei picchi di potenza che vanno oltre i 250W di potenza nominale, ma questa cosa è accettabile. In caso contrario, infatti, il motore si andrebbe a surriscaldare in modo eccessivo. Al fine di una corretta gestione della carica della batteria, si rende possibile l'erogazione di queste potenze solo con i livelli di assistenza più elevati, ma viene comunque tagliata la potenza se viene rilevata una temperatura del motore al di sopra del valore di temperatura limite.

Il rapporto di riduzione rappresenta uno degli elementi più significativi nella progettazione e nell'efficienza di una bicicletta a pedalata assistita. Tecnicamente, esso esprime la relazione tra il numero di giri compiuti dal motore elettrico e quelli effettuati dalla ruota motrice. In altre parole, indica quante volte il motore gira per ogni rotazione completa della ruota. Questo parametro ha un impatto diretto su tre aspetti chiave del funzionamento della e-bike:

1. Velocità massima raggiungibile
2. Coppia disponibile alla ruota (cioè la forza motrice)
3. Efficienza generale del sistema di trasmissione

Un rapporto di riduzione elevato implica che il motore elettrico compie molti giri per ogni singolo giro della ruota. Questo tipo di configurazione è vantaggioso nei contesti in cui è richiesta una maggiore coppia, ovvero una maggiore forza a basse velocità, come ad esempio durante la partenza o l'affrontare salite ripide. In queste situazioni, il motore lavora in un range di giri ottimale per garantire la spinta necessaria senza affaticare eccessivamente il sistema. Al contrario, un rapporto di riduzione basso comporta un numero inferiore di rotazioni del motore per ogni giro della ruota. Questo si traduce in una maggiore velocità finale ma con una coppia ridotta, e quindi minori capacità di trazione in condizioni impegnative. È la condizione tipica di un uso su terreni pianeggianti o in discesa, dove l'interesse principale è quello di mantenere alte velocità, riducendo il numero di giri del motore per risparmiare energia e contenere l'usura. Il concetto di rapporto di

riduzione è facilmente comprensibile se lo si paragona ai rapporti tra corona e pignoni in una bicicletta muscolare. Quando il ciclista riduce il numero di denti del pignone posteriore (o aumenta quello della corona anteriore), ottiene un rapporto più duro, adatto alla discesa o all'alta velocità, dove serve meno forza per avanzare. Al contrario, aumentando i denti del pignone posteriore (rapporto più morbido), si favorisce la salita, dove serve più coppia per superare la pendenza. Nel caso delle e-bike, questo concetto è traslato nella logica del motore elettrico, ma resta sostanzialmente invariato. Nella maggior parte delle biciclette a pedalata assistita, la trasmissione del moto è affidata a un sistema a catena, che offre buone prestazioni in termini di efficienza, economicità e semplicità di manutenzione. Tuttavia, negli ultimi anni si sta diffondendo anche la trasmissione a cinghia dentata, particolarmente apprezzata per la silenziosità e l'assenza di lubrificazione. La scelta del sistema di trasmissione, unita alla progettazione del rapporto di riduzione interno tra motore e ruota, influisce non solo sul comportamento dinamico della bicicletta, ma anche sulla durata e sull'affidabilità del motore. Una trasmissione ben dimensionata consente infatti al motore di operare in una fascia di rendimento ottimale, riducendo i consumi e prolungando la vita utile del sistema.

4 La coppia motrice, espressa in Newton per metro (Nm), rappresenta la forza torcente generata dal motore elettrico. In termini semplici, essa misura la capacità del motore di esercitare una rotazione sull'albero motore o, nel nostro caso, di fornire spinta alla ruota motrice della bicicletta. È un parametro fondamentale in quanto si traduce direttamente nella sensazione di assistenza che il ciclista percepisce durante la pedalata. Nel contesto delle biciclette a pedalata assistita, la coppia motrice è ciò che permette al motore di sostenere il ciclista nei momenti di maggiore richiesta energetica, come durante una partenza da fermo, nel superamento di salite impegnative o nel mantenimento di una velocità costante sotto carico. Maggiore è la coppia disponibile, più il motore sarà reattivo e in grado di fornire un'assistenza tangibile ed efficace, riducendo lo sforzo richiesto alle gambe del ciclista. Un motore con alta coppia sarà in grado di fornire una spinta immediata anche a basse velocità, rendendo la bicicletta agile e scattante. Questo è particolarmente utile in ambito urbano (dove sono frequenti le ripartenze) o in ambito off-road (dove è necessario superare ostacoli e pendenze). Di contro, una coppia più bassa rende il motore meno adatto alle salite, ma può essere sufficiente per usi più leggeri o in pianura, contribuendo a una maggiore efficienza energetica. Sebbene la coppia sia spesso considerata il parametro più rappresentativo delle prestazioni di un motore, non può essere analizzata isolatamente. Le reali performance della bicicletta dipendono da un insieme di fattori integrati, tra cui:

- La capacità e la tensione della batteria, che determinano quanta energia è disponibile per alimentare il motore e per quanto tempo.
- Il peso complessivo del sistema (telaio, motore, batteria e ciclista), che influenza direttamente il carico da spostare e quindi lo sforzo richiesto al motore.
- L'efficienza del sistema di trasmissione, che stabilisce quanta della potenza prodotta dal motore si trasmette effettivamente alla ruota.

Inoltre, è importante considerare anche la gestione elettronica del motore, ovvero l'algoritmo che controlla come e quando la coppia viene erogata. Alcuni motori, seppur dotati di valori nominali simili, possono risultare molto diversi tra loro nella risposta in fase di accelerazione, grazie a software più evoluti o sensori di pedalata più sofisticati.

Scelta e dimensionamento della batteria

	A	B	C	D	E	F
1	Motore					
2	Potenza Nominale [W]	250				
3	Tensione [V]	36				
4	Corrente massima [A]	15				
5	Potenza massima [W]	540				
6						
7	Assistenza motore		Corrente [Ah]	Potenza [Wh]		
8	Modalità Eco	20%	3	108		
9	Modalità Standard	40%	6	216		
10	Modalità tour	60%	9	324		
11	Modalità Boost	80%	12	432		
12						
13			Capacità teorica batterie			
14	Batterie	Ore di utilizzo [h]	Eco	Standard	Tour	Boost
15	Batteria 1	4	432	864	1296	2160
16	Batteria 2	5	540	1080	1620	2700
17	Batteria 3	6	648	1296	1944	3240
18				1336,50		
19				Autonomia		
20	Capacità batteria		13:53:20	06:56:40	04:37:47	03:28:20
21		1500,00				

Figura 9 Calcoli scelta batteria e dimensionamento

Come scritto in precedenza, essendo la batteria collegata ad un motore a 36V, questa dovrà avere la medesima tensione. Per la determinazione della capacità della batteria ci siamo posti nelle condizioni più sfavorevoli possibile. Successivamente ho ipotizzato i tempi di utilizzo e ho pensato che un utilizzo normale, si attesti tra le quattro e le cinque ore. Successivamente ho impostato una percentuale di utilizzo della potenza e sono andato a calcolare la capacità teorica di ogni batteria sfruttando questo dato. Ho poi mediato tra le capacità teorica ottenuta sulle ore considerate e ho sovradimensionato leggermente la scelta della batteria scegliendola con una capacità di 1500 Wh. Per fornire qualche informazione in più, mi sono andato a ricavare anche il tempo totale di funzionamento di questa batteria ottenendo che:

- 1 In modalità Eco si può utilizzare il veicolo per 13 ore, 53 minuti e 20 secondi;
- 2 In modalità Standard si può utilizzare il veicolo per 6 ore, 56 minuti e 40 secondi;
- 3 In modalità Tour si può utilizzare il veicolo per 4 ore, 37 minuti e 47 secondi;
- 4 In modalità Boost si può utilizzare il veicolo per 3 ore, 28 minuti e 20 secondi;

Ovviamente questi sono dati puramente indicativi. Non sono espliciti. Bisognerebbe infatti considerare il tipo di percorso svolto e le modalità con cui si va a svolgere suddetto percorso. Se infatti sono presenti forti accelerazioni o grandi dislivelli, è evidente che l'autonomia della batteria calerà in quanto viene richiesto più sforzo al motore elettrico che, a sua volta, richiederà più energia alla batteria.



Specifiche 36 V:

Volt nominale: 36 V

Cella della batteria: 18650

Dimensioni della batteria: 360 * 90 * 110 mm

Corrente di scarica costante massima: 25 A

Corrente di picco: 60 A

Tensione di carica: 42 V

Tensione di interruzione della scarica: 28 V

Durata del ciclo: 1000 volte

Temperatura di carica: -15-65°C

Temperatura di scarico: -15-65°C

Figura 10 Batteria scelta e sue specifiche

7 Ricarica solare [7] [8] [9] [10]

I pannelli solari sono dispositivi progettati per trasformare l'energia del sole in energia elettrica, grazie a un fenomeno fisico noto come effetto fotoelettrico. Questo processo sfrutta il comportamento degli elettroni presenti nei materiali semiconduttori — generalmente il silicio — che, quando colpiti dalla luce solare, si eccitano e si spostano. Se il pannello è collegato a un carico, questo movimento genera una corrente elettrica; al contrario, in assenza di carico, si sviluppa semplicemente una differenza di potenziale ai capi del dispositivo. Come avviene per ogni sistema che converte energia da una forma all'altra, anche i pannelli solari sono caratterizzati da un rendimento di conversione, che rappresenta l'efficienza con cui riescono a trasformare l'energia solare in energia elettrica. Tale efficienza si ottiene calcolando il rapporto tra la potenza elettrica in uscita e la potenza solare in ingresso. Tra le principali specifiche tecniche di un pannello fotovoltaico vi è la cosiddetta potenza di picco, ovvero il massimo output che il pannello può fornire in condizioni standard di laboratorio: temperatura ambiente di 25 °C e irraggiamento solare pari a 1000 W/m². Tuttavia, queste condizioni sono ideali e difficilmente replicabili in ambiente reale, dove la temperatura e l'intensità della luce possono variare in modo significativo.

L'efficienza operativa di una cella fotovoltaica dipende da numerosi fattori, tra cui:

1. Qualità e rendimento del materiale semiconduttore impiegato nella cella;
2. Tolleranze di fabbricazione, ovvero la precisione rispetto ai valori progettuali ideali;
3. Livello di irraggiamento solare che incide sulle celle;
4. Angolo di incidenza dei raggi solari rispetto alla superficie del pannello;
5. Temperatura di esercizio del dispositivo, poiché l'aumento della temperatura tende a ridurre il rendimento;
6. Composizione spettrale della luce solare, ossia le diverse lunghezze d'onda che compongono la radiazione ricevuta;
7. Banda spettrale assorbita dalle celle (analizzata tramite la risposta spettrale), che determina quali frequenze della luce solare possono essere effettivamente convertite in energia elettrica.

Un singolo modulo fotovoltaico è in grado di generare, a vuoto, una tensione compresa generalmente tra i 40 e i 50 Volt, mentre la corrente massima che può circolare in condizioni di cortocircuito si aggira tra i 9 e i 12 Ampere. Se analizziamo il comportamento del pannello tramite il classico diagramma tensione/corrente (V/I), possiamo osservare che, partendo dalla tensione a vuoto, l'incremento del carico — e quindi della corrente — provoca una progressiva riduzione della tensione. Questa decrescita diventa particolarmente accentuata vicino alla zona in cui si raggiunge la corrente di cortocircuito, creando una caratteristica "curva a ginocchio". Un aspetto molto rilevante riguarda la sensibilità dei pannelli fotovoltaici alla temperatura. I cosiddetti coefficienti termici variano infatti a seconda della tecnologia impiegata. I pannelli monocristallini e policristallini, per esempio, presentano un coefficiente termico intorno a $-0,5\%/^{\circ}\text{C}$, il che significa che l'efficienza del pannello diminuisce dello 0,5% ogni 10°C di aumento rispetto alla temperatura standard di riferimento, fissata a 25°C . Questo dato è cruciale per valutare le prestazioni reali degli impianti in climi caldi o in situazioni di esposizione prolungata al sole. In generale, i pannelli fotovoltaici si suddividono in tre principali categorie, in base alla struttura delle celle che li compongono: monocristallini, policristallini e a film sottile. Ognuna di queste tecnologie presenta specifiche caratteristiche in termini di rendimento, costo e comportamento in condizioni ambientali differenti. La differenziazione viene fatta in base al tipo di celle fotovoltaiche che costituiscono i pannelli. Andando più nello specifico possiamo notare che:

1 I pannelli monocristallini sono noti per la loro elevata efficienza energetica. Ogni cella è ricavata da un wafer con struttura cristallina uniforme, tipica dei materiali monocristallini. Per migliorarne le proprietà elettriche, il materiale viene sottoposto a un processo chiamato "drogaggio", che consiste nell'aggiunta di piccole quantità di un altro elemento chimico, generalmente un metallo, al semiconduttore puro. Questa modifica permette di aumentare la conducibilità del materiale, in quanto gli atomi droganti introducono cariche libere (elettroni o lacune) nel reticolo cristallino. Nel caso di una giunzione di tipo **n**, l'elemento aggiunto ha un elettrone in eccesso, il quale può muoversi liberamente all'interno del materiale. Gli elementi comunemente usati per questo tipo di drogaggio sono arsenico e fosforo. Al contrario, nella giunzione di tipo **p**, l'atomo drogante ha un elettrone in meno, creando così una "lacuna", cioè una zona che si comporta come se fosse una carica positiva mobile. La giunzione p-n, elemento fondamentale nelle celle fotovoltaiche, rappresenta il confine tra una regione con eccesso di elettroni (zona n) e una con eccesso di lacune (zona p). È proprio in questa zona che si genera il campo elettrico necessario alla produzione di corrente quando la cella viene colpita dalla luce solare. Questi pannelli sono di facile riconoscimento in quanto hanno un colore molto scuro.



Figura 11 Pannello fotovoltaico monocristallino

2 Nei pannelli policristallini, a differenza di quelli monocristallini, il wafer non è costituito da un singolo cristallo, ma da un insieme di cristalli più piccoli (grani) disposti in modo disordinato. Questa configurazione strutturale comporta un'efficienza energetica leggermente inferiore. Tuttavia, questi pannelli hanno il vantaggio di riuscire a catturare meglio la luce durante l'intera giornata, anche quando i raggi solari non sono perfettamente perpendicolari alla loro superficie. Un altro aspetto distintivo è il colore: i pannelli policristallini si riconoscono per la loro tonalità blu brillante. Nonostante queste peculiarità, rimangono comunque sensibili all'ombreggiamento: anche un'ombra parziale su una sola cella può compromettere il rendimento dell'intero pannello in modo significativo.³ I

pannelli fotovoltaici a film sottile sono invece realizzati depositando del materiale semiconduttore su un supporto di tipo vetroso. Il modulo in film sottile viene realizzato tramite una singola cella monolitica e non richiede l'assemblaggio di più celle. Ha una presenza di materiale semiconduttore presente nel pannello notevolmente inferiore rispetto ai pannelli realizzati con celle standard, riducendo così i costi di produzione.



Figura 12 Pannello fotovoltaico policristallino

3 I pannelli fotovoltaici a film sottile sono realizzati tramite la deposizione di materiali semiconduttori su un supporto, solitamente in vetro o altro materiale rigido. A differenza

delle tecnologie basate su celle distinte, in questo caso il modulo è formato da un'unica struttura monolitica. Questo approccio consente di utilizzare quantità molto ridotte di materiale semiconduttore rispetto alle celle tradizionali, con un impatto positivo sui costi di produzione. Sebbene l'efficienza di conversione sia generalmente inferiore rispetto ai pannelli mono e policristallini, i film sottili offrono maggiore flessibilità in termini di applicazione e design, risultando ideali per installazioni non convenzionali o integrate nell'architettura. I materiali di cui sono realizzati questi pannelli, non sono però immuni da impurità, anzi, sono proprio il contrario. I moduli a film sottile sono suddivisi in sottocategorie a loro volta. Troviamo:

- a) Silicio amorfo: I pannelli realizzati con silicio amorfo utilizzano una struttura non cristallina, in cui gli atomi di silicio non seguono un ordine regolare. Questa disposizione, definita "amorfa", permette di impiegare una quantità ridotta di materiale, ma comporta in genere una minore efficienza rispetto ad altre tecnologie fotovoltaiche più consolidate.
- b) Tellurio di cadmio: Tra i pannelli a film sottile sono i meno costosi, ma ne è stato vietato l'utilizzo a causa dell'elevata tossicità.
- c) Solfuro di cadmio: Il solfuro di cadmio è utilizzato nella produzione di alcune celle fotovoltaiche a basso costo, grazie a una tecnica che consente di stendere il materiale come una pellicola sottile, similmente a una vernice. Tuttavia, il rendimento di questi pannelli è modesto e l'uso del cadmio solleva problemi ambientali e sanitari, riducendone la diffusione.
- d) Arseniuro di gallio: questa è una lega binaria e riesce a garantire rendimenti elevati. I pannelli sono utilizzati soprattutto in ambiente militare o di ricerca. Questo accade proprio a cause dell'elevato costo di produzione.



Figura 13 Pannello fotovoltaico a film sottile

7.1 Scelta del pannello fotovoltaico

Considerando le necessità progettuali, in particolare la necessità di contenere il peso totale del sistema, le tecnologie tradizionali basate su silicio monocristallino o policristallino, pur essendo molto diffuse, non risultano adatte. Si è quindi deciso di orientarsi verso pannelli a film sottile, noti per la loro leggerezza e adattabilità. Tra le opzioni disponibili sul mercato, è stato selezionato un modello prodotto dalla Solbian, azienda italiana con forte esperienza nella produzione di pannelli solari flessibili ad alte prestazioni. Il modello SP 118Q della serie SP si distingue per l'elevata efficienza, grazie all'impiego di celle monocristalline di ultima generazione, capaci di convertire oltre il 24% dell'energia solare incidente in energia elettrica. Questo pannello rappresenta un buon compromesso tra efficienza, leggerezza e flessibilità, tre caratteristiche fondamentali per applicazioni mobili e dinamiche come quella in oggetto. L'impiego di tale dispositivo consente di ridurre i tempi di ricarica e migliorare l'autonomia del sistema, senza compromettere l'ergonomia complessiva del mezzo. O senza dover apportare modifiche radicali alla scocca. Vi sono diverse ragioni, oltre al peso, per le quali la mia scelta è ricaduta proprio su questo pannello. In primo luogo, il fatto che lavori a 12V. segue poi il peso. Come scritto in precedenza, infatti, questo pannello solare è molto leggero. Pesa solo un kilo e mezzo. Un'altra scelta che ha guidato la mia scelta verso questa tipologia di pannello è stato il coefficiente termico. In questo pannello, infatti, il coefficiente termico è molto minore rispetto al valore medio dei pannelli monocristallini soliti. Un valore di -0.38% è infatti più che soddisfacente. Questo dato mi indica di quanto cala il rendimento all'aumentare della temperatura dell'aria di dieci gradi centigradi.



Datasheet

	SP 144	SP 130	SP 118 L	SP 118 Q	SP 104	SP 78	SP 52 L	SP 52 Q
Maximum power [W]	144	130	118	118	104	78	52	52
Length Y [mm]	1490	1363	1236	855	1109	855	1109	601
Width X [mm]	546	546	546	800	546	546	292	546
Thickness [mm]	2	2	2	2	2	2	2	2
Weight [kg]	1.9	1.7	1.6	1.60	1.40	1.10	0.80	0.80
Max power Voltage Vmp [V]	25.3	22.8	20.7	20.7	18.2	13.7	9.1	9.1
Max power Current Imp [A]	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
Open circuit voltage Voc [V]	30.0	27.3	24.5	24.5	21.8	16.4	10.9	10.9
Short circuit current Isc [A]	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
NOCT [°C]	45 ± 2	45 ± 2	45 ± 2	45 ± 2	45 ± 2	45 ± 2	45 ± 2	45 ± 2
Operating temperature [°C]	-40/+85	-40/+85	-40/+85	-40/+85	-40/+85	-40/+85	-40/+85	-40/+85
Temp. coeff. Pmax [%/°C]	-0.38	-0.38	-0.38	-0.38	-0.38	-0.38	-0.38	-0.38
Temp. coeff. Voc [%/°C]	-0.27	-0.27	-0.27	-0.27	-0.27	-0.27	-0.27	-0.27
Temp. coeff. Isc [%/°C]	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Columns x Rows (cells n°)	4x11 (44)	4x10 (40)	4x9 (36)	6x6 (36)	4x8 (32)	4x6 (24)	2x8 (16)	4x4 (16)
Maximum system voltage [V]	1000 V	1000 V	1000 V	1000 V	1000 V	1000 V	1000 V	1000 V
Maximum reverse current [A]	12 A	12 A	12 A	12 A	12 A	12 A	12 A	12 A
Safety class	A	A	A	A	A	A	A	A

* Values at STC = Standard Test Conditions: (a) light Spectrum for an Air Mass of 1.5; (b) irradiance of 1000 W/m² with perpendicular incidence and (c) cell temperature of 25 °C. Measurements carried out according to the Standard IEC 61215 requirements.

Figura 14 Catalogo (Solbian) scelta pannello fotovoltaico

8 Regolatore di carica e massimizzazione della conversione dell'energia solare [11] [12] [13]

8.1 Regolatore di carica: un dispositivo indispensabile per salvare la batteria

La tensione e la corrente che vengono rilasciati dal pannello fotovoltaico sono “dannose” per la batteria al punto da rischiare di danneggiarla. Per evitare che ciò accada, vengono utilizzati dei regolatori. Utilizzando questo sistema (obbligatorio in quanto il nostro impianto produce più del due per cento della capacità della batteria), si riesce a preservare la durata della batteria. La funzione principale del regolatore è infatti quella di monitorare la tensione delle batterie e di regolare la quantità di energia proveniente dai pannelli solari al fine di non generare sovraccarichi o scariche profonde. Sebbene il suo funzionamento sia semplice, risulta essere anche molto efficace. Possiamo andare a suddividere la panoramica di lavoro in una serie di passaggi chiave:

1 Monitoraggio della tensione: la tensione viene costantemente rilevata dal regolatore. Questo aspetto è di cruciale importanza in quanto la tensione di una batteria ne indica anche il suo stato di carica.

2 Confronto e controllo in base al dato di tensione: in base alla tensione in ingresso che viene rilevata, il regolatore va ad attuare un confronto tra la tensione attuale della batteria e quella ideale che si va a ricercare. Nel caso in cui la tensione in ingresso sia maggiore di quella desiderata, il regolatore entrerà in funzione andando ad adattare il valore di tensione proveniente dai pannelli solari a quello richiesto dalle batterie.

3 Modulazione dell'impulso: qui è dove entra effettivamente in gioco la PWM. Lo scopo del regolatore è infatti quello di inviare la corretta tensione alla batteria, regolando e modulando la larghezza degli impulsi generati dai pannelli solari. Possiamo avere due casi:

- a) Tensione delle batterie vicine alla tensione di riferimento: questo ci indica che le batterie sono quasi completamente cariche; quindi, gli impulsi saranno brevi;
- b) Tensione delle batterie lontana dalla tensione di riferimento: questo è indice di una batteria scarica. In questo caso gli impulsi saranno più lunghi al fine di avere un maggiore afflusso di energia alle batterie e consentirne così la ricarica;

Questo processo consente di monitorare la tensione in arrivo alle batterie. Si evita infatti che vi siano tensioni troppo alte quando la batteria è carica, o tensioni troppo basse quando la batteria è scarica. In questo modo si riesce ad estendere la durata di vita della batteria. Un passo avanti rispetto a questa tecnologia è stato fatto tramite l'utilizzo di regolatori MPPT. A differenza degli altri, infatti, questi sono in grado di sfruttare tutta la potenza generata dal pannello. Per comprendere meglio il concetto, andiamo a svolgere dei conti con i nostri dati di riferimento del pannello precedentemente scelto, ricordando che la potenza di un pannello è esprimibile come il prodotto tra la corrente e la tensione generate dal pannello. Nel nostro caso siamo fortunati in quanto la potenza è già espressa nel catalogo ed è di 118W. In ogni caso la tensione di riferimento sarebbe 20,7V, mentre la corrente sarebbe 5,7A. con un classico regolatore tradizionale PWM si avrebbe che la corrente in ingresso alla batteria sarebbe pari alla corrente erogata dal pannello. Un regolatore MPPT invece va ad analizzare la potenza erogata dal pannello andando anche a considerare la tensione di quest'ultimo e andando a regolare i parametri in funzione degli altri. Questo sistema inoltre cerca di smorzare la produzione di energia elettrica in base alle diverse condizioni di funzionamento del pannello, andando a considerare: ombreggiamento, temperatura del pannello solare e le caratteristiche elettriche del carico.



Figura 15 Regolatore di carica MPPT

8.2 Il regolatore di carica scelto con la sua scheda tecnica

Seguendo gli aspetti descritti in precedenza e basandoci sul confronto tra pregi e difetti dei regolatori PWM e MPPT, risulta subito chiaro che l'ideale per il nostro progetto è un MPPT. Sfogliando i cataloghi, la mia scelta è ricaduta sul "GVB-8-Li 41.7V-WP". Questo è un regolatore MPPT prodotto dall'azienda Genasum con particolari caratteristiche significative:

1 Grazie alla sua conformazione e al modo in cui è stato costruito è impermeabile. Questo è un aspetto cruciale per tutti i componenti elettronici, specialmente se devono stare all'aria aperta;

2 Risulta avere buona efficienza anche in caso di scarsa illuminazione. Questo aspetto è decisamente positivo in quanto sappiamo che uno dei tasti dolenti dei pannelli fotovoltaici è proprio l'efficienza in caso di scarsa illuminazione;

Specifications:		GVB-8-WP, All Models			
Rated Panel (Input) Current: ¹		8 A			
Minimum Panel Voltage for Charging:		5 V			
Minimum Battery Voltage for Operation:		9.5 V			
Trickle Charge to Recover Dead (0V) Battery:		Yes			
Maximum Input Panel:		60 V			
Recommended Max Panel Voc at STC:		50 V			
Input Voltage Range:		0-60 V			
Maximum Input Short Circuit Current: ^{1,2}		8 A			
Maximum Input Current: ¹		15 A			
Tracking Efficiency:		99+% typical			
MPPT Tracking Speed:		15 Hz			
Operating Temperature:		-40 °C - 85 °C			
Maximum Full Power Ambient: ⁴		70 °C			
Environmental Protection:		IP68, Waterproof			
Connection:		Flying Leads, 16 AWG tinned wire, pre-stripped			
Weight:		10.3 oz (290 g)			
Dimensions:		5.5" x 3.2" x 2.2", (14 cm x 8.1 cm x 5.5 cm)			
Warranty:		5 years			
		GVB-8-Pb-12V-WP	GVB-8-Pb-24V-WP	GVB-8-Pb-36V-WP	GVB-8-Pb-48V-WP
Charge Profile:		Multi-Stage with Temperature Compensation			
Nominal Battery Voltage:		12 V	24 V	36 V	48 V
Maximum Recommended Panel Vmp:		13 V	26 V	41 V	43 V
Maximum Recommended Panel Power (8A Panel w/~155mm cells):		105 W	210 W	325 W	350 W
Bulk Voltage:		14.4 V	28.8 V	43.2 V	57.6 V
Absorption Voltage:		14.2 V	28.4 V	42.6 V	56.8 V
Absorption Time:		2 Hours			
Float Voltage (Pb models) or CV Voltage (Li models):		13.8 V	27.6 V	41.4 V	55.2 V
Re-Absorb (Re-Bulk): ⁵		12.5 V	25 V	37.5 V	50 V
Battery Temperature Compensation:		-28 mV/°C	-56 mV/°C	-84 mV/°C	-112 mV/°C
Electrical Efficiency:		95% - 97% typical	96% - 98% typical	96% - 98% typical	96% - 99% typical
Night Consumption:		7 mA	6 mA	6 mA	5 mA

Figura 16 Scheda tecnica regolatore MPPT

9 Assemblaggio della parte elettrica

Ora che siamo giunti alla fine della scelta dei componenti elettrici per quanto riguarda il pacco motore-batteria, è il momento di montare questi pezzi. Il montaggio è relativamente semplice, infatti, come veniva già anticipato nell'introduzione di questa tesi, molte delle biciclette elettriche sono state elettrificate senza ricorrere a manodopera specializzata. Partiamo dal motore. Avendo scelto un motore centrale, è inevitabile che il suo alloggiamento sia in corrispondenza del movimento centrale. Dal motore vengono solitamente fatti uscire tre cavi: un negativo e un positivo che si andranno a collegare alla batteria e che avranno lo scopo di fornire energia al motore e un cavo dedicato a portare i dati al computer al fine di poter lasciare al ciclista la possibilità di decidere se accendere o meno l'assistenza e, in caso di accensione, di deciderne l'intensità. Vengono inoltre trasferiti dei dati come: la velocità di percorrenza, i chilometri percorsi, la velocità media, la velocità massima e, infine, lo stato di carica della batteria con eventualmente l'autonomia residua in termini di tempo e di distanza. Seguendo i cavi positivi e negativi, come dicevo prima, si arriva alla batteria, la quale, a sua volta, è collegata al regolatore di carica. In mezzo a questi due componenti viene posto un fusibile da 20° al fine di migliorare la sicurezza e, in caso di sovraccarichi, andare ad arrestare il sistema. Continuando a ritroso arriviamo al pannello fotovoltaico che è collegato al regolatore. Tutto questo schema è ben descritto nell'immagine sotto riportata in cui bisogna ricordarsi che sotto la voce "load" vi è collocato il motore con tutti i collegamenti elettrici precedentemente spiegati.

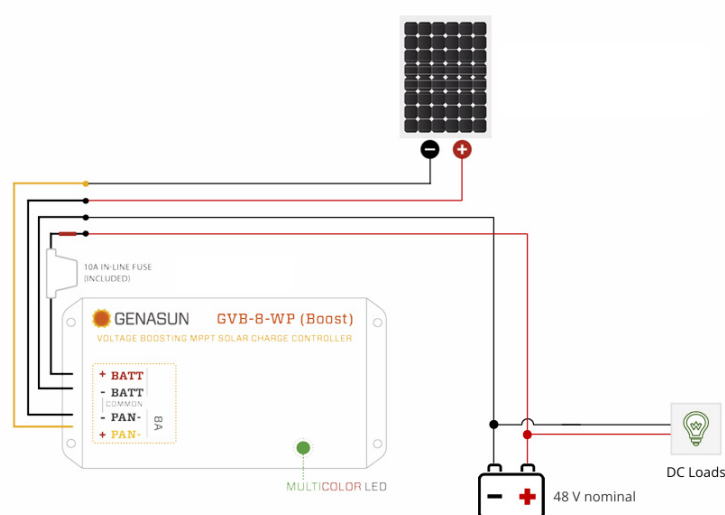


Figura 17 Schema elettrico di collegamento

10 Parte meccanica per la trasmissione del moto

Ora che abbiamo terminato la scelta dei componenti elettronici ed elettromeccanici per fornire assistenza al ciclista, risulta importante scegliere in numero di denti della corona anteriore, lo spessore, il materiale e il tipo di catena utilizzata per trasmettere il moto ed infine il pacco pignoni, ovvero il range di rapporti posteriori espresso in numero di denti. Innanzitutto, occorre tenere presente il fatto che in commercio vi sono più tipologie di cambio per biciclette:

1 Cambio meccanico a deragliatore: è il cambio più vecchio e più largamente diffuso visto il suo scarso costo di produzione e la sua semplicità di realizzazione. È leggero e supporta un'ampia gamma di rapporti (nelle ultime versioni si è arrivati ad avere anche undici velocità). Questo aspetto non è banale, in quanto i pignoni sono montati solo da un lato della ruota; quindi, aggiungerne di più significa andare a “comprimere” sempre di più i raggi verso il vero raggio geometrico della ruota, compromettendo così la resistenza. I ricambi sono economici e facilmente reperibili ed il funzionamento è facile, infatti, tramite un movimento meccanico (solitamente una rotazione) si va a regolare la lunghezza di un filo metallico che va a spostare la posizione di un deragliatore che, a sua volta, fa “saltare” la catena da un pignone all'altro o da una corona all'altra. Sul deragliatore posteriore è presente una molla. Lo scopo di questa molla è quello di andare a spostare la posizione delle due rotelle minori. Questo movimento ha lo scopo di andare a adattare il percorso

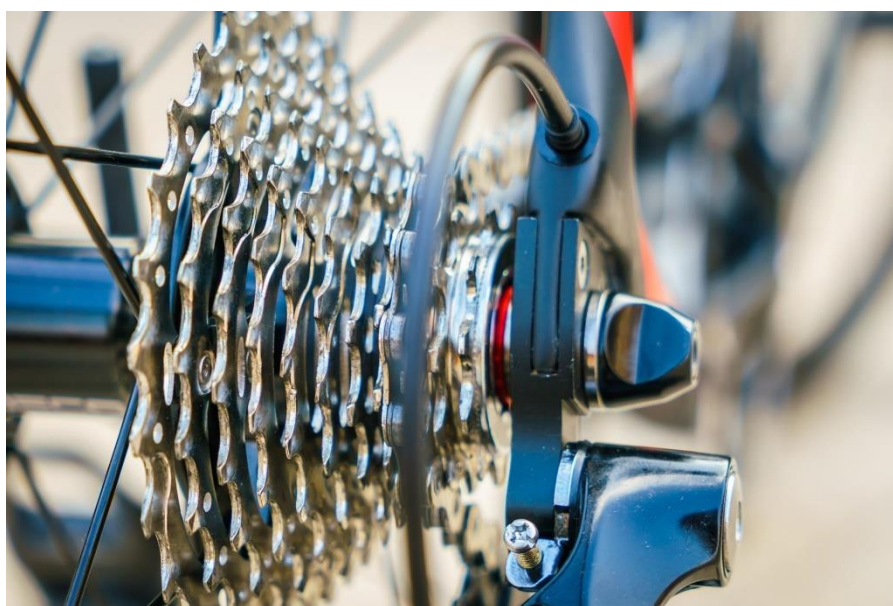


Figura 18 Deragliatore posteriore

effettuato dalla catena in relazione al tipo di rapporto scelto. Infatti, ipotizzando di avere la stessa corona, se alleggerisco il rapporto, la catena dovrà percorrere una distanza maggiore, mentre l'opposto accade se vado ad indurire il rapporto. Di contro ha però che è esposto agli urti, alle intemperie e richiede una manutenzione periodica sia di pulizia che di regolazione. La stessa tecnologia viene utilizzata anche nel caso in cui siano presenti più di una corona all'anteriore. Quello che cambia è semplicemente la forma del deragliatore.



Figura 19 Deragliatore anteriore

2 Cambio interno al mozzo: tecnologia sviluppata negli ultimi anni e adatta a biciclette con trasmissione a cinghia in gomma. Il cambio è integrato nel mozzo della ruota posteriore. I vantaggi sono: il sistema è protetto da sporco e urti. Risulta possibile cambiare rapporto anche da fermi. Questa cosa è molto utile, specialmente in città. Richiede poca manutenzione e d è esteticamente più pulita la linea complessiva.



Figura 20 Cambio interno al mozzo

3 Cambio automatico o elettronico. Il sistema viene integrato con l'elettronica della bicicletta. Può essere completamente automatico se si va a regolare il rapporto in base a velocità e cadenza di pedalata, oppure elettronico a comando sfruttando un input fornito da pulsanti. Alcuni sistemi possono essere simili a dei CVT (cambi a variazione continua). Questa tipologia di cambio è più fluida e non richiede nessun pensiero sul cambio se lo si utilizza in modalità automatica. Risulta essere molto silenzioso. Di contro ha il fatto di essere più costoso, più difficile da riparare e rende la bicicletta dipendente dall'elettronica.



Figura 21 Cambio elettronico

Anche in questa tipologia di cambi è possibile individuare due sottocategorie: una prima in cui troviamo i cambi elettronici a filo e una seconda in cui troviamo i cambi elettronici wireless. La differenza, come dice anche il nome, sta nella presenza o nell'assenza di un filo che parte dai comandi ed arriva al cambio.

Per una ragione di costo e per una ragione andremo a scegliere un cambio a deragliatore meccanico e, sempre per limitare i costi e per avere una migliore facilità di utilizzo, andiamo a scegliere di utilizzare una sola corona all'anteriore. In questo modo la scelta del rapporto di trasmissione scelta dal ciclista dipenderà esclusivamente dal tipo di pignone selezionato.

10.1 Scelta del pacco pignoni posteriore e della catena

Il pacco pignoni fornisce al ciclista la scelta su quale rapporto utilizzare in base alle condizioni fisiche o della strada. Dobbiamo tenere in considerazione due aspetti. Il primo è quello che ho spiegato in precedenza parlando del cambio a deragliatore meccanico, il secondo è quello che non si può far fare alla catena dei “salti” troppo grandi. Risulta infatti difficile se non impossibile far effettuare alla catena un salto superiore a otto denti. Mi spiego meglio: ipotizzando che un pignone abbia una dentatura di 10 denti, il pignone precedente dovrà avere una dentatura massima di 18 denti. In questo modo si riescono ad ingranare bene senza rovinare la superficie dei denti e la catena. Per il nostro scopo direi che un pacco pignoni a dieci velocità sia più che sufficiente. Non sono voluto andare oltre in quanto vi è un altro aspetto da considerare e che ben si relazione con il numero massimo ammissibile di pignoni. Non potendo ridurre oltre un certo limite la distanza tra i raggi e il centro della ruota, siamo obbligati a restringere la distanza tra un pignone e l'altro andando di conseguenza ad assottigliare lo spessore della catena, rendendola così più soggetta ad allungamento e ad una usura precoce. Per i nostri scopi possiamo scegliere un pacco pignoni con i seguenti denti:

11-13-16-20-24-28-32-36-42-50

Sull'anteriore viene invece posta una catena da 36 denti. In questo modo si avrebbe un rapporto di trasmissione che varia tra 3,27, se s'innesta il pignone da undici denti, e 0,72 se s'innesta il pignone da cinquanta denti. La scelta della catena va a ricadere su una HG-X 10-v della Shimano del peso di 273 grammi e con una lunghezza massima di 114 maglie.

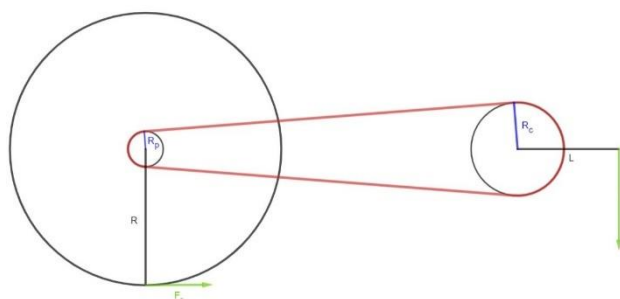


Figura 22 Rapporto di trasmissione

11 Montaggio dei componenti

Adesso che abbiamo deciso la catena, la corona e il pignone, è giunto il momento di montare questi pezzi. La corona viene resa solidale con la pedivella e montata sul movimento centrale. I pignoni sono invece montati sul mozzo posteriore della ruota. Questo potrebbe essere il punto più critico in quanto si deve stare attenti ad allineare correttamente il pacco pignoni al mozzo. Si deve infatti cercare una linguetta sul pacco pignoni e far combaciare questa nella sua sede realizzata sul mozzo. Vengono poi montati, se previsti e se presenti nel pacco pignoni, gli appositi distanziali tra i vari pignoni. Si stringe poi la ghiera di fissaggio e si rimonta tutto quanto nella sede.

12 Conclusioni

Il progetto è ancora in fase di sviluppo, ma ha già permesso di analizzare e approfondire i principali componenti costitutivi della *velobike*. L'obiettivo non era quello di realizzare sin da subito una soluzione definitiva, bensì di costruire una base solida su cui fondare progetti futuri più completi e ottimizzati. Tra gli elementi esaminati, l'integrazione di un motore elettrico per l'assistenza alla pedalata si è rivelata una scelta strategica per incentivare l'adozione di mezzi sostenibili, soprattutto tra coloro che, per motivi fisici o logistici, trovano difficoltà nell'uso quotidiano della bicicletta tradizionale. Uno degli aspetti più innovativi del progetto è stato lo studio dell'integrazione di un pannello solare per la ricarica della batteria. Questa soluzione, seppur sperimentale, ha mostrato un potenziale concreto per incrementare l'autonomia del mezzo e ridurre la necessità di ricariche da rete elettrica. Parallelamente, l'attenzione posta sull'ottimizzazione della trasmissione — attraverso una scelta mirata di catena, corona e pignone — ha consentito un alleggerimento complessivo del sistema meccanico, migliorando l'efficienza complessiva del veicolo. Tuttavia, non sono mancate criticità. La dipendenza dalle condizioni atmosferiche rappresenta ancora un limite significativo: l'efficienza del sistema solare cala drasticamente in presenza di nuvolosità prolungata o in ambienti urbani poco esposti alla luce diretta. In questi casi, permane la necessità di una fonte elettrica esterna per garantire la continuità del servizio. Inoltre, l'attuale mercato non offre soluzioni completamente integrate e pronte all'uso (*plug and play*) per questo tipo di conversione. La realizzazione richiede l'acquisto separato dei componenti e competenze tecniche specifiche per l'installazione e la configurazione, con un conseguente aumento dei costi e della complessità dell'intervento. Nonostante queste difficoltà, il progetto ha messo in luce l'elevato potenziale delle biciclette elettriche alimentate da fonti rinnovabili come mezzo di trasporto urbano. In particolare, si è rivelato uno strumento efficace per sensibilizzare sull'importanza della mobilità sostenibile, mostrando come anche una semplice bicicletta possa trasformarsi in una piattaforma tecnologica ricca di sfide ingegneristiche, tanto dal punto di vista meccanico quanto da quello energetico. In sintesi, lo scopo principale non era costruire una soluzione definitiva, bensì esplorare le possibilità offerte dall'integrazione tra mobilità dolce e tecnologie pulite. Il lavoro svolto ha evidenziato come sia possibile, con la giusta progettazione, trasformare la bicicletta in un veicolo del futuro, capace di ridurre l'impatto ambientale e adattarsi alle esigenze della mobilità urbana moderna. Il percorso intrapreso rappresenta un primo passo verso soluzioni sempre più efficienti, accessibili e integrate, in linea con il crescente interesse verso la tutela dell'ambiente e lo sviluppo sostenibile.

Ringraziamenti

Ci sono così tante persone che devo ringraziare che quasi sicuramente ne dimenticherò qualcuna per strada. Vorrei cominciare ringraziando una persona molto importante per me. Qualcuno con cui passo molto tempo assieme e che sa essere il mio migliore e il mio peggior nemico. Comincerei ringraziando me stesso. Mi ringrazio per non aver ascoltato quei professori che finite le superiori mi dissero che era impossibile fare un percorso d'ingegneria dall'agraria. Per un po' li ho anche ascoltati, poi mi è venuta in mente una frase di una canzone che ascolto spesso: *“come fai a saperlo se nemmeno ci provi nemmeno?”* e infatti mi sono iscritto. Sono entrato ai ripescaggi, ma sono entrato e indovinate? Dopo due giorni, volevo mollare: “troppa matematica.” Mi sono detto. Ed ecco che qui vengono fuori le altre persone che devo ringraziare: i miei genitori, i miei nonni e Felicia che, a modo loro, mi hanno sempre motivato ad andare avanti ed è grazie a loro se oggi sono arrivato fino qui. È grazie a loro se finalmente posso dire di esser diventato “ingegnere”, ma ciò non sarebbe mai stato possibile senza l'aiuto dell'Ing. Zanotti. Lui mi ha infatti guidato in quelli che sono stati i miei esami più ostici, aiutandomi a superarli. Per un periodo avevo pensato di piantare le tende di fronte a casa sua. Ero più lì che a casa. Cosa avevo detto? Troppa matematica? Grazie Elisa. Grazie per avermi spiegato tutto lo scibile umano di matematica e fisica durante il primo anno. Non eravamo e non siamo due persone proprio semplicissime da prendere, ma abbiamo funzionato bene per quello che dovevamo fare. Mi ricordo ancora la tua faccia mentre facevamo meccanica razionale che mi fa: “e che caspita è una molla a spirale?” Ecco... se lei lo ha fatto una volta per un componente, io l'ho fatto almeno mille per ogni teorema di analisi. Ah, e parentesi: il tuo villaggio è ancora al sicuro. Sempre restando in tema, mi piacerebbe tornare ad una lezione che più che scrivere, abbiamo riso... Valli c'eri anche tu quando vi siete fatti fuori mezzo chilo di caramelle in due durante la lezione di Rivola. Scherzi a parte. Grazie anche a te per tutti i consigli, per tutte le ore passate al telefono a ripetere la roba degli esami e per la tua infinita pazienza nell'attendere un mio messaggio di risposta (anche se questo non vale solo per te). Sempre parlando di “alessandri”, vorrei ringraziare Fabbri. Quanti scleri su informatica e tecnologia b. Ci siamo conosciuti quasi per caso e tranquillo, anche la mia prima impressione non era stata delle migliori, ma poi ti sei fatto voler bene a modo tuo. Mi ricordo il periodo in cui dovevi dare alcuni esami ed eri più al telefono con me che con la tua ragazza. Tanto è vero che avevo preso il soprannome di “amante di ale”. Poi restando in tema c'è marcolino. Non abbiamo mai condiviso tanto in termini di esami o di confronto, ma abbiamo condiviso molto in termini di rapporti umani. Un po' com'è successo con Emilia e Giada. Per Melissa invece è un po' più complicato il discorso. Non è la persona da chiamare per avere informazioni durante un esame, ma se state passando un brutto

periodo, state pur certi che lei vi farà ridere, ma vi farà anche riflettere se state facendo uno sbaglio, ma senza mai giudicarvi o darvi contro. Per concludere il cerchio dell'università mi restano due sole persone: Polverelli. Anche se ci siamo persi di vista durante l'ultimo tempo, è indimenticabile la sfilza di imprecazioni che hai tirato a casa mia quando non hai passato l'esame di geometria (ne avevi anche tutte le ragioni). Grazie, comunque, per essere stato un fedele compagno di viaggio e grazie per tutte le ore passate a preparare Olmi. E Sofia che ho conosciuto praticamente per caso in un periodo orribile, ma che, a modo suo, ha saputo rallegrare. Indimenticabile quella notte a festeggiare il mio compleanno l'anno scorso, con la torta sul baule del BMW di un'altra persona particolare: Mike. È grazie a voi due se ho scoperto quanto mi piaccia stare a schiena piegata dentro ad un cofano. Poi vabbè... Mike è anche il mio insegnante di meccanica personale. Quante cavolate fatte assieme in quel garage, ma prima di vedermi nuovamente legato ad un fenicottero rosa con il nastro americano, mi sa che dovrai aspettare almeno qualche altra vita. A proposito di meccanica... è stato bello poter provare a divulgare la mia passione tramite un canale youtube assieme a Mondo e Nilo. Vi metto assieme perché tanto, parlare con uno, significa parlare anche con l'altro di conseguenza. Grazie per essere venuti a casa mia a spalare il fango quando tutto sembrava perso. Avevamo fango anche dentro alle mutande, eppure sorridevamo. Siamo entrati in macchine dai bauli e abbiamo fatto cose impensabili in quel momento. Siete sicuramente due caratteri completamente diversi, ma sapete essere dei grandi amici quando ce n'è bisogno. Grazie per essermi stati vicino in tutti i momenti. Passiamo poi fuori dall'argomento meccanica, anche se non del tutto per ringraziare due persone. Forse alcuni possono già immaginarsi di chi io stia parlando, ma ora lo sveliamo per gli atri. Forse Gaia tu sei la persona che conosco da più tempo qui. Mi hai visto attraversare tanti momenti e mi hai sempre accolto a braccia aperte quando avevo più bisogno di parlare. Non c'è bisogno di scrivere molto. Sai già tutto tu. Poi vorrei ringraziare Fede. So che ci siamo sentiti ad intermittenza, ma quelle poche uscite che abbiamo fatto in mezzo alla sessione o in mezzo alle lezioni, erano utili per staccare la testa un po', anche se il giorno della F1, resterà per sempre indimenticabile. Ora lo so... lo so... Valentina sarà già là che scalpita perché non sente che ho ancora pronunciato il suo nome, ma non è che vi posso presentare tutti assieme. Devo seguire un ordine mentale, o rischio di perdermi, già ho la memoria di un criceto. Cosa devo dire se non un grazie grande quanto una casa? Condividiamo assieme la passione per la musica. A volte ci sotterra, ma riusciamo sempre a trovare un modo per andare avanti. Quanto tu sei in crisi, fai affidamento su di me e quando io sono in crisi, faccio affidamento su di te. Ci facciamo da spalla a vicenda e forse è proprio questo ciò che ci rende così forti e così "indistruttibili". E infine ultimo, ma non per importanza, Fulvio. Il giorno in cui ti ho conosciuto, sarei dovuto andare al mare, poi ho girato per Mirabilandia. Mi pento di quella scelta? Beh... dipende sotto quale lato la guardiamo.

Se la guardiamo sotto il lato amicizia no. Sei una delle persone più fedeli ed oneste che io conosca. Anche se ti ho beccato in un brutto periodo, emanavi una radiosità che avrebbe fatto sentir bene chiunque. E comunque... col senno di poi, sarebbe stato meglio non esserci andati su Ispeed... tu che dici?

Grazie mille ragazzi. Grazie mille a tutti voi. Sicuramente mi sarò dimenticato qualcuno (vi prego non sparatemi). La laurea è come il ciclismo. È una cosa individuale, ma di squadra e voi siete\ siete stati la mia squadra

Bibliografia e sitografia

- 1 <https://www.dueruote.it/e-bike/2024/08/01/ancma-rapporto-conebi-2024.html>
- 2 [Biciclette elettriche ad energia solare ? Ci son già.](#)
- 3 <https://www.ezoomed.it/blog/e-bike/normativa-codice-della-strada-bici-elettrica/>
- 4 [Circolazione-Stradale > Codice della strada > Articolo 50 CdS](#)
- 5 <https://ebikebatteryshop.it/quali-sono-le-tipologie-di-batterie-per-le-bici-elettriche/>
- 6 <https://www.stihl.it/it/diy-stihl/manutenzione-attrezzi-da-giardino/informazioni-batterie/effetto-memoria-batteria#:~:text=L'effetto%20memoria%20%C3%A8%20una,solo%20quella%20quantit%C3%A0%20di%20energia.>
- 7 https://it.wikipedia.org/wiki/Pannello_fotovoltaico#Dati_tecnici
- 8 <https://it.wikipedia.org/wiki/Drogaggio>
- 9 https://it.wikipedia.org/wiki/Giunzione_p-n
- 10 <https://www.qesco.it/pannelli-monocristallini-o-policristallini-caratteristiche>
- 11 <https://oniroview.com/blogs/articoli-del-blog/il-regolatore-di-carica-cos-e-e-come-funziona?srsId=AfmBOoo3VvEm5iePfzdLg9quz55qCcMWEOW8PTTCz6UhhpmI1FXP1JdT>
- 12 <https://blog.ilportaledelsole.com/2014/09/16/regolatori-di-carica-mppt/>
- 13 https://en.wikipedia.org/wiki/Maximum_power_point_tracking#Placement