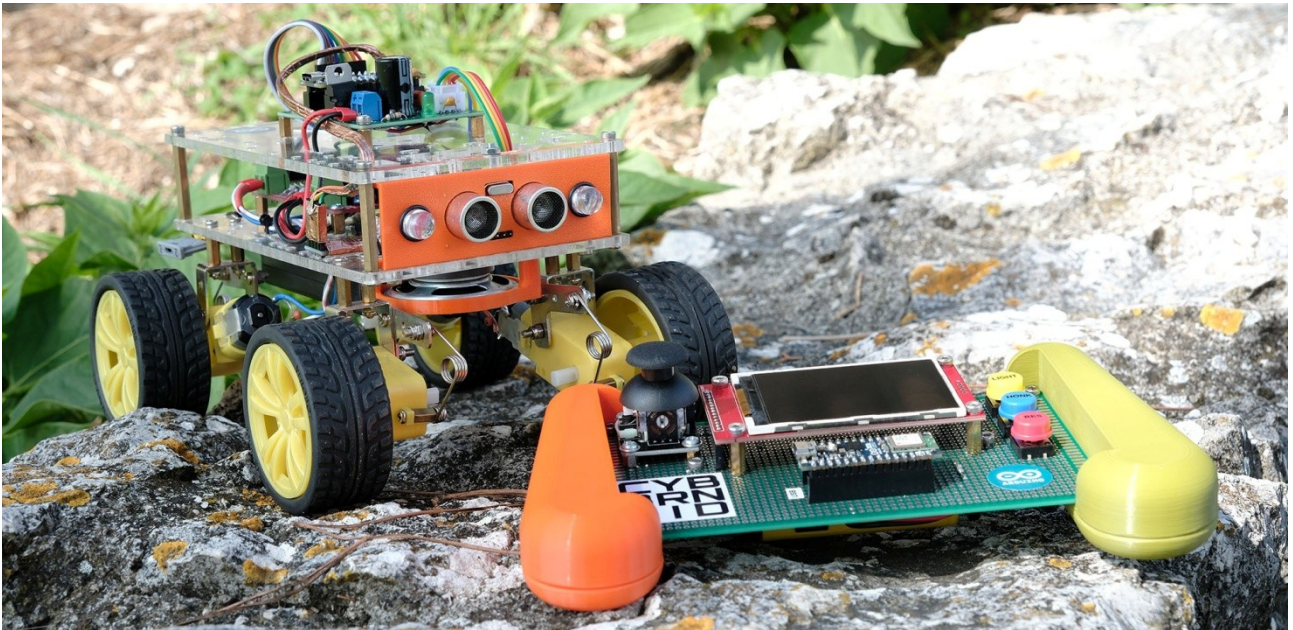


ENROV

Veicolo teleoperato basato su
Arduino Nano ESP32



Revisione documento: 001_IT del 18/10/2023

Autore



Questo progetto su Github



Questo documento



Giovanni 'CyB3rn0id' Bernardo

Indice generale

1. Panoramica.....	3
2. Meccanica di gioco.....	3
3. Tecnologie utilizzate.....	4
3.1 Protocollo di comunicazione ESP-NOW.....	4
3.2 Processore Dual-Core.....	5
3.3 Batterie al Litio-Polimero riciclate.....	5
4. Modalità di funzionamento.....	5
4.1 Utilizzo del comando remoto.....	5
4.1.1 Alimentazione.....	5
4.1.2 Accensione e Spegnimento.....	6
4.1.3 Elementi di controllo.....	7
4.1.4 Indicazioni sul display.....	7
4.1.5 Segnalazione Allarmi.....	9
4.1.6 Altre segnalazioni.....	10
4.2 Utilizzo del veicolo.....	11
4.2.1 Alimentazione.....	11
4.2.2 Accensione e spegnimento.....	11
4.2.3 Segnalazioni.....	12
4.2.4 Timeout.....	12
5. Caratteristiche tecniche.....	12
5.1 Caratteristiche veicolo.....	12
5.2 Caratteristiche Radiocomando.....	13
6. Requisiti.....	13
6.1 Energetici.....	13
6.2 Ingombri.....	14
7. Schemi elettrici.....	15
7.1 Schema Radiocomando.....	15
7.2 Schema Veicolo.....	16
8. Riferimenti.....	17

1. Panoramica

Il progetto è costituito da due oggetti separati: un modello di veicolo a 4 ruote motrici (ovvero un *ROV – Remote Operated Vehicle*) ed un comando remoto che permette di teleoperare il veicolo e ricevere i dati di telemetria.

Il veicolo ha un singolo motoriduttore per ogni ruota, i motori di ogni lato sono collegati in parallelo. La guida è quindi di tipo differenziale (la sterzata si ottiene variando la velocità dei motori per ogni lato) e il controllo dei motori in PWM è in modalità Locked Anti-Phase (velocità e verso di rotazione sono stabiliti dal duty cycle del segnale PWM).

Entrambi gli oggetti sono governati ciascuno da un **Arduino Nano ESP32** e comunicano tra di loro utilizzando il protocollo wireless **ESP-NOW** che consente di coprire distanze di alcune decine di metri (rilevati max circa 150m in aria libera, in zona libera da interferenze RF).

Il progetto è fornito a scopo dimostrativo, ovvero illustrare in maniera interattiva l'implementazione di una comunicazione wireless bidirezionale utilizzando un protocollo non comune.

Il nome scelto per il progetto è *ENROV* che è un acronimo per *Esp-Now Remote Operated Vehicle*.

2. Meccanica di gioco

L'utente ha a disposizione il comando remoto mediante il quale è possibile controllare il veicolo da una certa distanza. Il comando remoto permette sia un'interazione visiva (osservare sul display posto sul radiocomando stesso i dati di telemetria forniti dal veicolo) sia fisica (spostare il veicolo, interagire con l'ambiente esterno mediante accessori già presenti, come suoni e luci, o implementabili in futuro).

A differenza di una classica automobile radiocomandata in cui l'interazione è in un solo verso (da radiocomando verso veicolo), in questo caso la comunicazione è bidirezionale: il veicolo viene controllato, ovvero riceve dati dal comando remoto, ma trasmette anche informazioni relative al proprio stato di funzionamento, con il valore aggiunto che, avendo a disposizione il codice sorgente reso pubblico, gli

elementi di interazione possono essere aumentati a piacimento (es.: aggiungere un braccio controllabile da remoto, aggiungere ulteriori sensori per ricevere dati dall'ambiente che circonda il veicolo) compatibilmente alle limitazioni del protocollo wireless implementato.

3. Tecnologie utilizzate

Radiocomando e Veicolo sono basati ciascuno su un Arduino Nano ESP32, che, montando un microcontrollore a 32bit ESP32-S3, contiene già tutto il necessario per poter effettuare comunicazioni Wireless sfruttando vari protocolli radio operanti nella **banda dei 2.4GHz**, tra cui i più conosciuti sono WiFi e Bluetooth.

3.1 Protocollo di comunicazione ESP-NOW

In quest'applicazione viene utilizzato il protocollo di comunicazione "ESP-NOW", inventato da **Espressif** ovvero la casa produttrice del microcontrollore montato su Arduino Nano ESP32. Tale protocollo è applicabile solo sui microcontrollori della stessa casa.

ESP-NOW è un protocollo radio utilizzabile per quantità di dati limitate che sfrutta la banda dei 2.4GHz, ovvero la stessa utilizzata da WiFi e Bluetooth. Comunicazioni WiFi, Bluetooth e ESP-NOW possono coesistere sullo stesso dispositivo senza influenzarsi, anche se con alcune limitazioni in quanto sfruttano la stessa antenna.

Il protocollo ESP-NOW è stato scelto per questa applicazione in quanto poco comune (e quindi si può parlare di qualcosa di relativamente nuovo), molto semplice da implementare sia a livello codice che concettuale e può essere utilizzato esclusivamente per trasmettere brevi pacchetti di dati della **lunghezza massima di 250bytes** (e questo dal mio punto di vista può essere visto come un vantaggio in quanto costringe a ragionare in termini diversi a quelli a cui la tendenza del mercato ci sta abituando: ovvero utilizzare bande passanti enormi, con spreco di energie e risorse, solo per trasmettere pochi dati essenziali).

Pertanto tale protocollo non è utilizzabile per trasmettere immagini e video, ma è adatto per realizzare sistemi di controllo e gestione che prevedono la trasmissione di dati da sensori (applicazioni classiche, ad esempio, sono costituite dal controllo di colture agricole automatizzate). Per questo tipo di applicazioni è un protocollo eccezionale che consente di avere bassi consumi sia energetici che di risorse a bordo della CPU.

3.2 Processore Dual-Core

ESP32-S3 è un microcontrollore **dual-core**. Nelle normali applicazioni viene utilizzato il core 1 di default e raramente viene utilizzato il secondo core (core 0). Sul radiocomando tutta la parte di rendering grafico sul display viene computata dal core 0 che è stato quindi dedicato esclusivamente a tale funzionalità, lasciando il resto al core 1: questo rende il refresh del display più veloce e fornisce una maggiore efficienza nella gestione della comunicazione. Sul veicolo, il core 0 si occupa di alcune funzioni accessorie (emissione di suoni) mentre il resto è demandato al core 1.

3.3 Batterie al Litio-Polimero riciclate

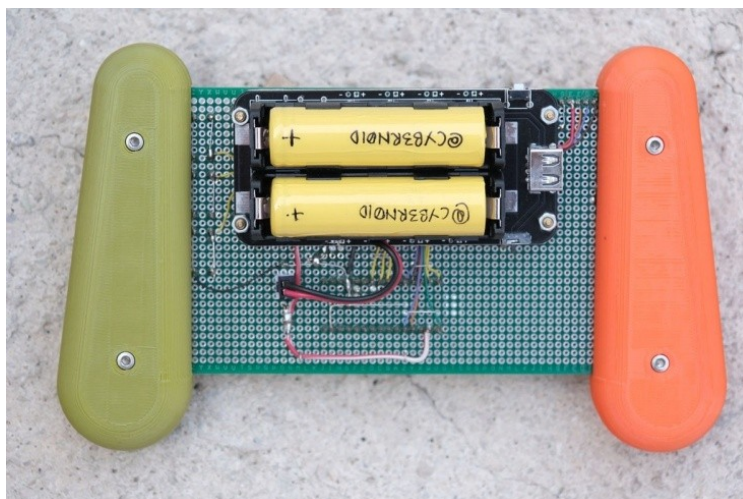
Una delle parti più inquinanti e pericolose degli elettrodomestici odierni è costituita dalle batterie. In questa applicazione vengono utilizzate celle LiPo recuperate da batterie di portatili dismessi: le batterie dei Laptop vengono aperte e smantellate, le singole celle vengono separate e testate con vari cicli di ricarica per controllare se il livello di carica viene raggiunto e mantenuto nel tempo, le batterie che superano i test vengono riciclate rimuovendo le parti usurate e apponendo una nuova guaina protettiva esterna. In tal senso il progetto illustra anche alcuni esempi di come riutilizzare tale tipologia di batteria, recuperata, per applicazioni reali.

4. Modalità di funzionamento

4.1 Utilizzo del comando remoto

4.1.1 Alimentazione

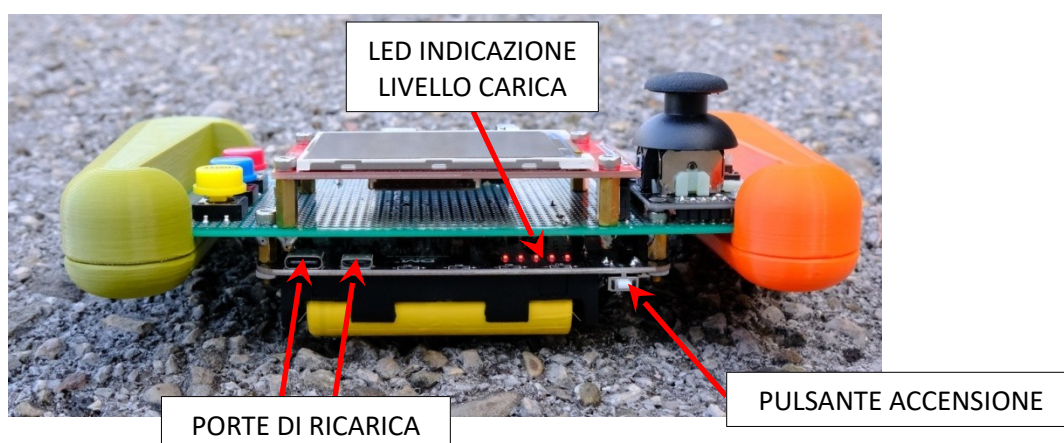
Il comando remoto, nella parte sottostante, ha un circuito powerbank che ha la possibilità di alloggiare fino a 2 batterie LiPo tipo 18650 collegate in parallelo



E' quindi possibile alimentare il comando remoto anche con una sola batteria: in questo caso chiaramente l'autonomia è dimezzata. Ad ogni modo si consiglia di utilizzare sempre due batterie in modo tale che possano eventualmente essere scambiate con quelle del veicolo.

Il circuito powerbank presenta più uscite a 5V e 3.3V : viene utilizzata esclusivamente un'uscita a 3.3V per alimentare tutto il circuito mediante un connettore JST.

Il circuito powerbank presenta un connettore USB femmina tipo A sulla destra che può essere utilizzato per alimentare altri dispositivi. Nella parte superiore sinistra sono presenti due connettori USB tipo C e micro che vengono utilizzati per la ricarica delle batterie (i connettori non vanno usati contemporaneamente!). In questo caso sarà utilizzato un caricabatterie classico da cellulare.



Il circuito Power Bank possiede 5 led rossi visibili al di sotto del suo PCB. Questi led indicano la carica disponibile (tutti e 5 accesi: carica massima, 1 solo led

lampeggiante: carica minima). I led si accendono anche durante la ricarica, indicando il livello di carica raggiunto.

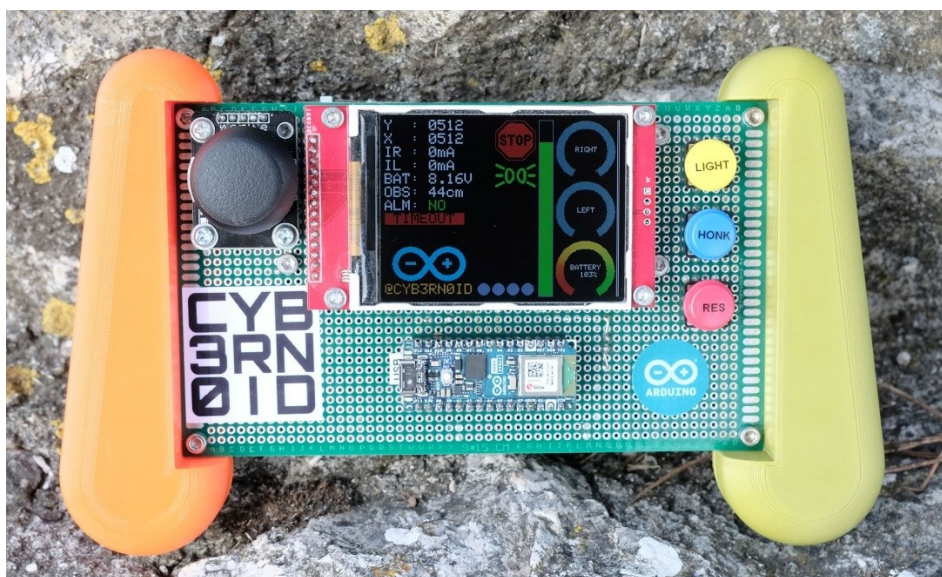
Si consiglia di utilizzare il radiocomando anche per la ricarica delle batterie del veicolo per questioni di comodità.

4.1.2 Accensione e Spegnimento

Il comando remoto possiede un tasto bianco in alto a destra: un click permette l'accensione, un doppio click lo spegnimento.

4.1.3 Elementi di controllo

Il comando remoto, visto frontalmente, presenta un joystick analogico sulla sinistra, un display a colori al centro e 3 tasti sulla destra.



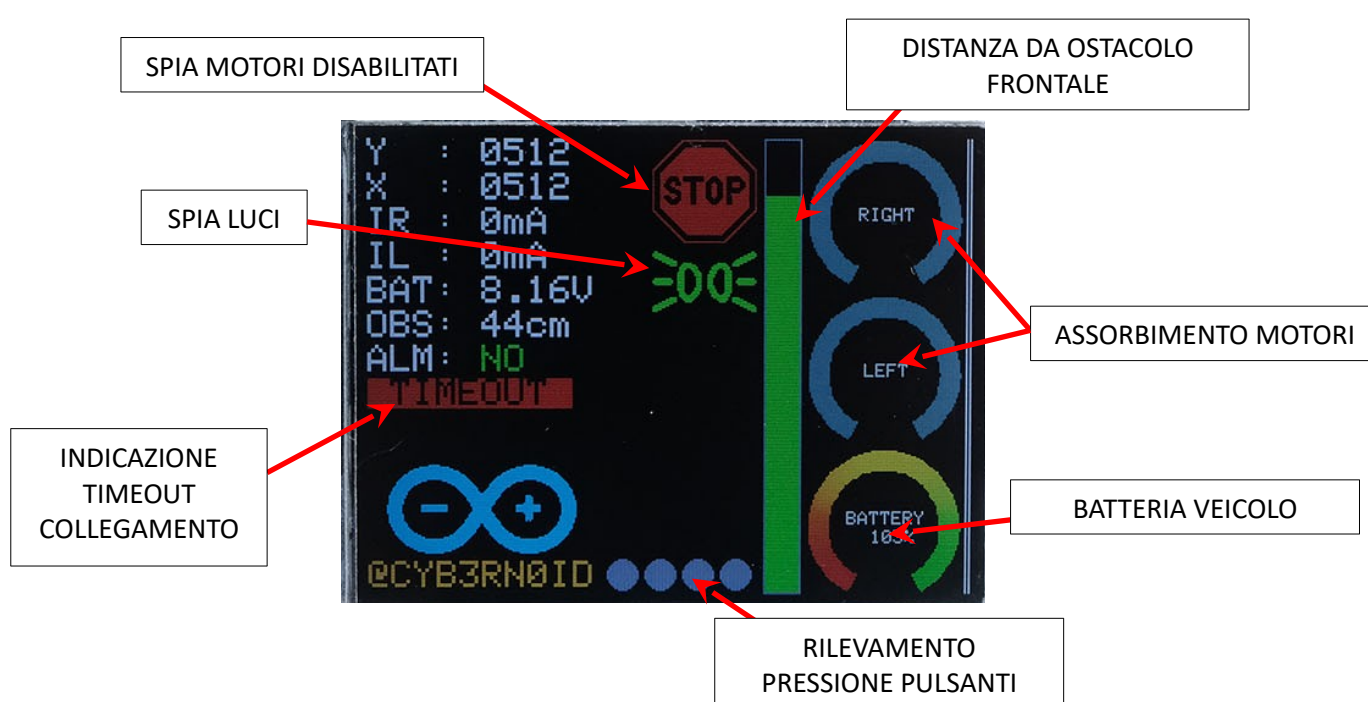
Mediante il joystick posto sul radiocomando è possibile pilotare il veicolo a distanza permettendogli di andare avanti e indietro in linea retta o con deriva oppure di ruotare su se. Viene sfruttata la funzionalità analogica del joystick che permette di regolare anche la velocità oltre che direzione e verso: ad esempio portando il joystick in avanti a metà corsa, il veicolo procederà in linea retta a metà della velocità possibile.

Il joystick possiede un pulsante posto sotto l'asse verticale della manopola di comando. Premendo l'asse dello stick è possibile disabilitare completamente l'erogazione di corrente ai motori.

I tasti sulla destra del comando remoto permettono di impartire ulteriori comandi al veicolo. Il tasto giallo (LIGHTS) esegue l'accensione/spegnimento delle luci frontali, costituite da due led ad alta luminosità a luce bianca, da 10mm. Il tasto blu (HONK) fa emettere un suono robotico al veicolo nello stile di R2D2 di guerre stellari. Il tasto rosso (RES) resetta eventuali allarmi presenti sul veicolo che ne hanno indotto lo "stop di emergenza" (vedi ¶ 4.1.5).

4.1.4 Indicazioni sul display

Il display centrale del comando remoto riporta sia tutti i dati provenienti dal veicolo, sia alcuni dati impostati dal joystick stesso utili per questioni di debug.



Nell'angolo superiore sinistro sono riportati alcuni dati in forma testuale abbreviata:

- *Y* : posizione joystick sull'asse verticale
- *X* : posizione joystick sull'asse orizzontale
- *IR* : corrente assorbita dal gruppo motori destro, in mA o in A
- *IL* : corrente assorbita dal gruppo motori sinistro, in mA o in A
- *BAT* : tensione batteria veicolo, in Volts
- *OBS* : distanza del veicolo da un ostacolo frontale, in centimetri
- *ALM* : presenza di allarmi (YES/NO)

Un'eventuale indicazione rossa **TIMEOUT** posta al di sotto di ALM indica che il radiocomando non riceve dati dal veicolo da almeno 2 secondi (definiti dalla macro

TIMEOUT in *vars.h* del sorgente radiocomando). Tale condizione è anche simulabile spegnendo il veicolo.

Gli indicatori “analogici” circolari sulla destra riportano in forma grafica, rispettivamente dall’alto verso il basso, i valori di corrente assorbita dai motori a destra, corrente assorbita dai motori di sinistra e percentuale di carica residua della batteria del veicolo.

La barra verticale affianco agli indicatori circolari è una rappresentazione visiva della distanza di un ostacolo posta frontalmente al veicolo: la lunghezza aumenta all’aumentare della distanza, man mano che l’oggetto si avvicina al sensore, la barra diminuisce di lunghezza e cambia colore da verde a giallo a rosso.

Gli elementi circolari in basso al centro indicano lo stato di pressione dei pulsanti (il primo indica la pressione del pulsante posto sotto l’asse del joystick, gli altri seguono la stessa colorazione del tasto premuto).

La presenza di un’icona ottagonale rossa STOP indica che è stato premuto l’asse del joystick e quindi il radiocomando sta inviando di continuo il segnale di disabilitazione dei motori.

La presenza di un’icona verde, simile alla spia generale delle luci sulle automobili, indica che è stato premuto il tasto giallo “LIGHTS” e quindi il radiocomando sta inviando di continuo il segnale di accensione delle luci.

Queste due icone non indicano, quindi, lo stato reale di abilitazione motori/luci accese sul veicolo ma solo il fatto che il radiocomando sta inviando i relativi flag.

4.1.5 Segnalazione Allarmi

Sul display del radiocomando viene indicata la eventuale presenza di allarmi sul veicolo con la dicitura rossa *YES* affianco all’indicazione *ALM* e l’evidenziazione in rosso dell’elemento che lo ha causato con il valore che ha causato l’allarme. In particolare gli allarmi che possono verificarsi sono:

- Eccessivo assorbimento di corrente da parte del gruppo motori sinistro
- Eccessivo assorbimento di corrente da parte del gruppo motori destro
- Tensione batteria veicolo troppo bassa

I primi due allarmi possono verificarsi nel caso in cui le ruote del veicolo rimangano bloccate a causa di impedimenti meccanici sia esterni che interni (es.: ruota bloccata

in un buco presente sul pavimento, ingranaggi rotti) ma anche, più raramente, nel caso in cui la batteria non sia più in grado di fornire la tensione richiesta per cui il veicolo: i motori, girando ma non ricevendo sufficiente tensione causano un assorbimento di corrente eccessivo per cercare di ottenere la potenza necessaria.

L'allarme tensione batteria ha lo scopo di preservare la batteria in quanto le batterie LiPo se raggiungono un valore di tensione troppo bassa, possono essere danneggiate in maniera irreparabile. Questo allarme si può verificare in maniera indiretta anche quando i motori sforzano in maniera eccessiva e causano una repentina caduta di tensione delle batterie.

Tutti gli allarmi causano lo stop di emergenza: ovvero il veicolo si ferma all'istante e viene interrotta la fornitura di corrente ai motori mediante disabilitazione del ponte H che li controlla (stessa condizione che si ha premendo lo stick per indurre lo stop manuale, con la differenza che non viene visualizzata l'icona di stop).

Il veicolo permane in questo stato di allarme fino a che non viene resettato l'allarme da radiocomando premendo il tasto rosso "RES" oppure fino a che non viene premuto il tasto di reset sulla scheda a microcontrollore presente sul veicolo. Lo stato di allarme è anche segnalato sul veicolo mediante lampeggio del led rosso.

Nello stato di allarme i segnali provenienti dal joystick non vengono computati, per cui nemmeno la pressione dello stick può indurre la riabilitazione dei motori.

Nel caso in cui la tensione di batteria è troppo bassa in modalità di riposo, l'allarme non verrà resettato ed è necessario procedere alla ricarica delle batterie. A tal scopo, per una demo in cui è richiesta un'interazione continua con le persone, sarebbe necessario avere a portata di mano più batterie 18650 già cariche.

Il valore massimo di corrente per ramo (1.55A) è impostato dalla macro `MOTOR_I_MAX` in `vars.h` del sorgente del veicolo ed è un dato che viene trasmesso insieme agli altri per consentire al radiocomando di disegnare correttamente gli indicatori.

Il valore minimo di tensione batteria (6.2V) è impostato dalla macro `BATTERY_V_MIN`. Anche questo dato viene trasmesso.

4.1.6 Altre segnalazioni

Vengono sfruttati i led presenti su Arduino Nano ESP32 per fornire altre indicazioni:

- Led giallo (`LED_BUILTIN`): il radiocomando ha ricevuto un pacchetto dati dal veicolo. Il led viene spento alla fine del processamento dei dati.
- Led rosso (`LED_RED`): l'accensione fissa di questo led all'atto dell'accensione del radiocomando indica un fallimento del setup della comunicazione ESP-NOW.
- Led verde (`LED_GREEN`): è stato ricevuto l'acknowledge dal veicolo, ovvero i dati inviati dal radiocomando sono stati ricevuti correttamente
- Led blue (`LED_BLUE`): non è stato ricevuto l'acknowledge dal veicolo, ovvero i dati inviati dal radiocomando sono stati persi a causa di svariati motivi (distanza eccessiva, interferenze, ecc). Se questa condizione si protrae in maniera sequenziale nel tempo, compare anche l'indicazione TIMEOUT sul display.

4.2 Utilizzo del veicolo

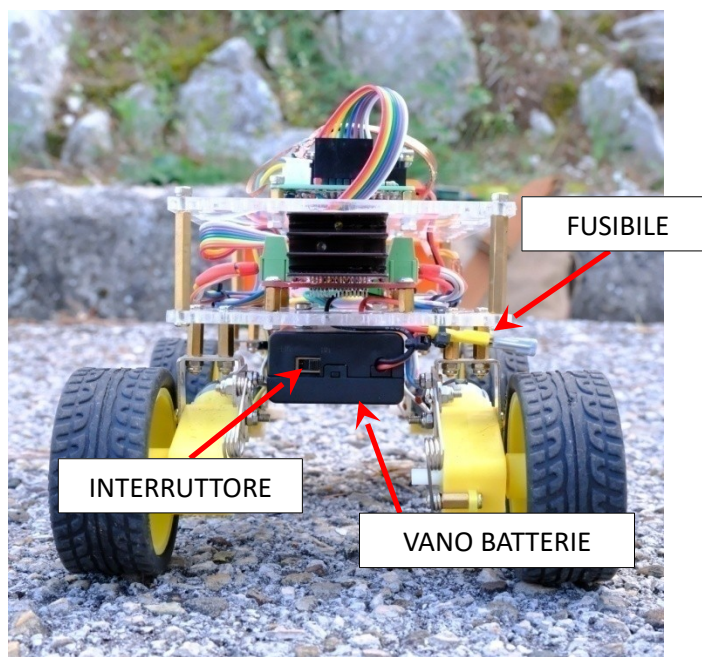
4.2.1 Alimentazione

Il veicolo, nella parte sottostante, ha un portabatterie in cui sono alloggiare due batterie LiPo tipo 18650 messe in serie. Il veicolo ha quindi una tensione di alimentazione in origine di max 8.4V. Le batterie utilizzate devono sempre viaggiare in coppia (e quindi avere stesso livello di tensione e stessa capacità).

In serie alla linea di alimentazione è posto un fusibile automotive da 2A per proteggere veicolo e ambiente circostante in caso di cortocircuiti che causino un assorbimento superiore ai 2A.

4.2.2 Accensione e spegnimento

Il portabatterie del veicolo possiede un interruttore a slitta. La posizione a sinistra è OFF, la posizione a destra è ON.



4.2.3 Segnalazioni

Per le segnalazioni vengono utilizzati i led presenti su Arduino Nano ESP32:

- Led giallo (`LED_BUILTIN`): il veicolo ha ricevuto un pacchetto dati dal radiocomando. Il led viene spento alla fine del processamento dei dati.
- Led rosso (`LED_RED`): l'accensione fissa di questo led all'atto dell'accensione del radiocomando, indica un fallimento del setup della comunicazione ESP-NOW. Se il led rosso lampeggia durante il normale utilizzo, vuol dire che si è verificato un allarme, che sarà identificato sul display del radiocomando.
- Led verde (`LED_GREEN`): è stato ricevuto l'acknowledge dal radiocomando, ovvero i dati inviati dal veicolo sono stati ricevuti correttamente.
- Led blue (`LED_BLUE`): non è stato ricevuto l'acknowledge dal radiocomando, ovvero i dati inviati dal veicolo sono stati persi a causa di svariati motivi (distanza eccessiva, interferenze).

4.2.4 Timeout

Anche il veicolo, così come il radiocomando, ha un timeout in caso di assenza ricezione dati. Tale valore (800mS) è impostato da `TIMEOUT` in `vars.h` e non è esplicitato in nessun modo: il veicolo viene eventualmente fermato ma senza allarmi e senza disabilitazione dei motori (viene portato il duty cycle al 50%), questo per

evitare che il veicolo continui a camminare in assenza di collegamento in virtù dell'ultimo comando ricevuto prima del timeout, evitando danni.

Tale condizione è comunque facilmente verificabile dal fatto che led blu rimane acceso indicando che non vengono più ricevuti dati dal telecomando. La condizione in questione è anche simulabile spegnendo il telecomando.

5. Caratteristiche tecniche

5.1 Caratteristiche veicolo

- Guida Differenziale. Controllo PWM in modalità LAP
- Chassis disponibile commercialmente dotato di 4 comuni motoriduttori tipo TT da 9V
- Presenza di un ponte H di esclusiva progettazione da 2A per canale, realizzato industrialmente ([Cent4ur](#))
- Misurazione della corrente assorbita dai motoriduttori
- Misurazione della tensione di batteria
- Alimentazione mediante due batterie LiPo 18650 in serie
- Interruzione alimentazione dei motori in caso di allarmi
- Sensore ultrasuoni (sonar) frontale
- Altoparlante 0.5W pilotato da amplificatore (*LM386*)
- Illuminazione esterna mediante 2 led ultra-bright da 10mm
- Fusibile da 2A

5.2 Caratteristiche Radiocomando

- Realizzato su millefori 150x90 supportata da due maniglie colorate disegnate e stampate in 3D (design originale)
- Joystick analogico 2 assi
- Display a colori 2.4 pollici 320x240 basato su ILI9341
- Alimentazione con una oppure due batterie LiPo 18650 in parallelo
- Powerbank per ricarica e alimentazione a 5 e 3.3V che mostra il livello di carica residua
- 4 Pulsanti
- Il telecomando può essere utilizzato per la ricarica delle batterie della macchina rimuovendo o scambiando le batterie già presenti.

6. Requisiti

6.1 Energetici

Il progetto non richiede alimentazione a tensione di rete in quanto sia il radiocomando che il veicolo sono alimentati con batterie ricaricabili.

Il veicolo necessita di due batterie LiPo di tipo 18650. Le batterie sul veicolo sono collegate in serie e generano una tensione massima di 8.4V DC.

Il radiocomando necessita di una o due (preferibile) batterie LiPo di tipo 18650. Le batterie sul radiocomando sono collegate in parallelo e generano una tensione massima di 4.2V.

L'unica richiesta di tensione di rete è eventualmente data da un caricabatterie standard (con uscita USB tipo micro o C) per la ricarica delle batterie nel radiocomando. E' possibile rimuovere le batterie del radiocomando e sostituirle con quelle del veicolo per la ricarica. Ad ogni modo è sempre necessario che le batterie vengano sempre gestite in coppia.

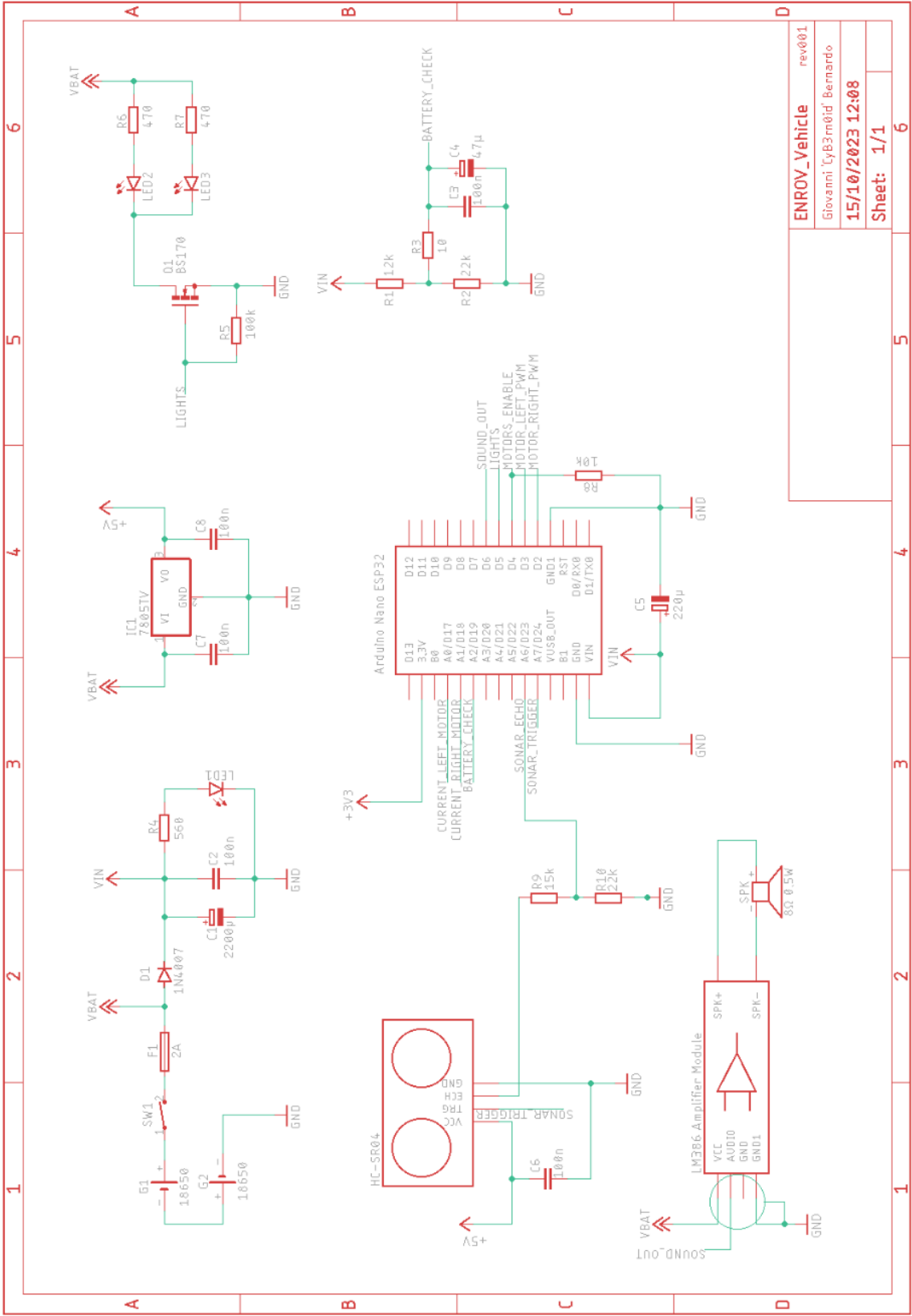
Sono richieste precauzioni nel maneggiare le batterie LiPo in quanto, in caso di cattiva gestione (ricarica sbagliata, inversione di polarità, altro) possono causare rischio di esplosione e/o incendio.

6.2 Ingombri

- Dimensioni veicolo: 215 x 165 x 160mm
- Peso veicolo: 780g (batterie incluse)
- Dimensioni radiocomando: 210 x 130 x 65mm
- Peso radiocomando: 330g (batterie incluse)

7.1 Schema Radiocomando

7.2 Schema Veicolo



8. Riferimenti

1. Arduino Nano ESP32 – Documentazione (<https://docs.arduino.cc/hardware/nano-esp32>)
2. Arduino Nano ESP32 – Acquisto (<https://store.arduino.cc/products/nano-esp32>)
3. Arduino Nano ESP32 – Cheatsheet (<https://docs.arduino.cc/tutorials/nano-esp32/cheat-sheet>)
4. ESP-NOW (<https://www.espressif.com/en/solutions/low-power-solutions/esp-now>)
5. Cent4ur motor controller (<https://www.settorezero.com/wordpress/info/servizi/cent4ur/>)
6. ESP32 – periferica LEDC (<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/peripherals/ledc.html>)
7. ESP-NOW FAQs
(<https://docs.espressif.com/projects/espressif-esp-faq/en/latest/application-solution/esp-now.html>)
8. ESP-NOW Tutorial (<https://www.hackster.io/CyB3rn0id/arduino-nano-esp32-esp-now-tutorial-a05784>)