

LaurTec

KiCad

La pista giusta al posto giusto

PCBWay

Sponsor del corso KiCad

Autore : *Mauro Laurenti*

ID: AN5002-IT

INFORMATIVA

Come prescritto dall'art. 1, comma 1, della legge 21 maggio 2004 n.128, l'autore avvisa di aver assolto, per la seguente opera dell'ingegno, a tutti gli obblighi della legge 22 Aprile del 1941 n. 633, sulla tutela del diritto d'autore.

Tutti i diritti di questa opera sono riservati. Ogni riproduzione ed ogni altra forma di diffusione al pubblico dell'opera, o parte di essa, senza un'autorizzazione scritta dell'autore, rappresenta una violazione della legge che tutela il diritto d'autore, in particolare non ne è consentito un utilizzo per trarne profitto.

La mancata osservanza della legge 22 Aprile del 1941 n. 633 è perseguibile con la reclusione o sanzione pecuniaria, come descritto al Titolo III, Capo III, Sezione II.

A norma dell'art. 70 è comunque consentito, per scopi di critica o discussione, il riassunto e la citazione, accompagnati dalla menzione del titolo dell'opera e dal nome dell'autore.

AVVERTENZE

I progetti presentati non hanno la marcatura CE, quindi non possono essere utilizzati per scopi commerciali nella Comunità Economica Europea.

Chiunque decida di far uso delle nozioni riportate nella seguente opera o decida di realizzare i circuiti proposti, è tenuto pertanto a prestare la massima attenzione in osservanza alle normative in vigore sulla sicurezza.

L'autore declina ogni responsabilità per eventuali danni causati a persone, animali o cose derivante dall'utilizzo diretto o indiretto del materiale, dei dispositivi o del software presentati nella seguente opera.

Si fa inoltre presente che quanto riportato viene fornito così com'è, a solo scopo didattico e formativo, senza garanzia alcuna della sua correttezza.

L'autore ringrazia anticipatamente per la segnalazione di ogni errore.

Tutti i marchi citati in quest'opera sono dei rispettivi proprietari.

Indice

Introduzione.....	4
Lo schema elettrico.....	4
Linee differenziali.....	7
PCB Editor.....	11
Conclusioni.....	16
Bibliografia.....	17
History.....	17

Introduzione

Realizzare lo sbroglio dello schema elettrico consiste nel collegare con le piste di rame due punti collegati tra loro, ovvero equipotenziali. Sebbene arrivati a questo punto abbiamo realizzato già il primo PCB, è bene vedere qualche altro dettaglio sul come decidere le caratteristiche che deve avere la pista di rame che collega due punti, ovvero larghezza, spessore, distanza da altre piste, distanza dal piano di massa, posizionamento in layer interni, caratteristiche termiche, resistenza, impedenza caratteristica, necessità di linee differenziali, skew con altre linee, lunghezza della pista.

Dal numero di parametri, da non considerarsi completo, si capisce che le considerazioni da tenere a mente sono molteplici. Il Capitolo affronterà diversi aspetti tecnici che aiuteranno a prendere le decisioni su come dimensionare la pista che collega due punti di interesse.

Lo schema elettrico

Sebbene stiamo parlando dello sbroglio dello schema elettrico, ovvero della realizzazione del PCB, KiCad offre differenti strumenti dal lato PCB Editor, che richiedono alcune considerazioni già durante la progettazione dello schema elettrico. In particolare bisogna associare le piste ad una *Net Class*, ovvero ad una classe. Una Classe è semplicemente un raggruppamento che facciamo in maniera da poter associare in un secondo tempo delle larghezze specifiche. Per esempio le piste per i segnali generici potrebbero essere di 10mil mentre le linee associate all'alimentazione potrebbero essere di 25mil. Per creare questa associazione, dalla *Toolbar* bisogna premere il tasto *Edit Schematic* :



Si aprirà la finestra di dialogo delle impostazioni dello schema, come mostrato in Figura 1. Dal lato sinistro bisogna selezionare *Net Classes*, al fine di ottenere la vista come in Figura1. Per un nuovo progetto esiste solo la classe *Default*, le altre devono essere aggiunte manualmente. In particolare per il progetto specifico sono state aggiunte le seguenti classi:

- Power_+
- Power_-
- Signal

Ad ogni classe è possibile associare un colore e larghezza della linea (*Wire Thickness*). Nel caso in cui la classe appartenga ad un bus, ovvero raggruppamento di più linee dello stesso tipo, è possibile definire un'altra larghezza della pista (*Bus Thickness*). Ad ogni linea è poi possibile associare un colore e anche un tipo di tratto, per esempio continuo (*Solid*), tratteggiato (*Dashed*), a punti (*Dotted*) o altro.

Queste caratteristiche appena descritte, influenzano lo schema elettrico. Per cui la larghezza delle piste appena descritta, influenza solo il tratto, ovvero lo spessore, della linea nello schema elettrico e non quella del PCB.

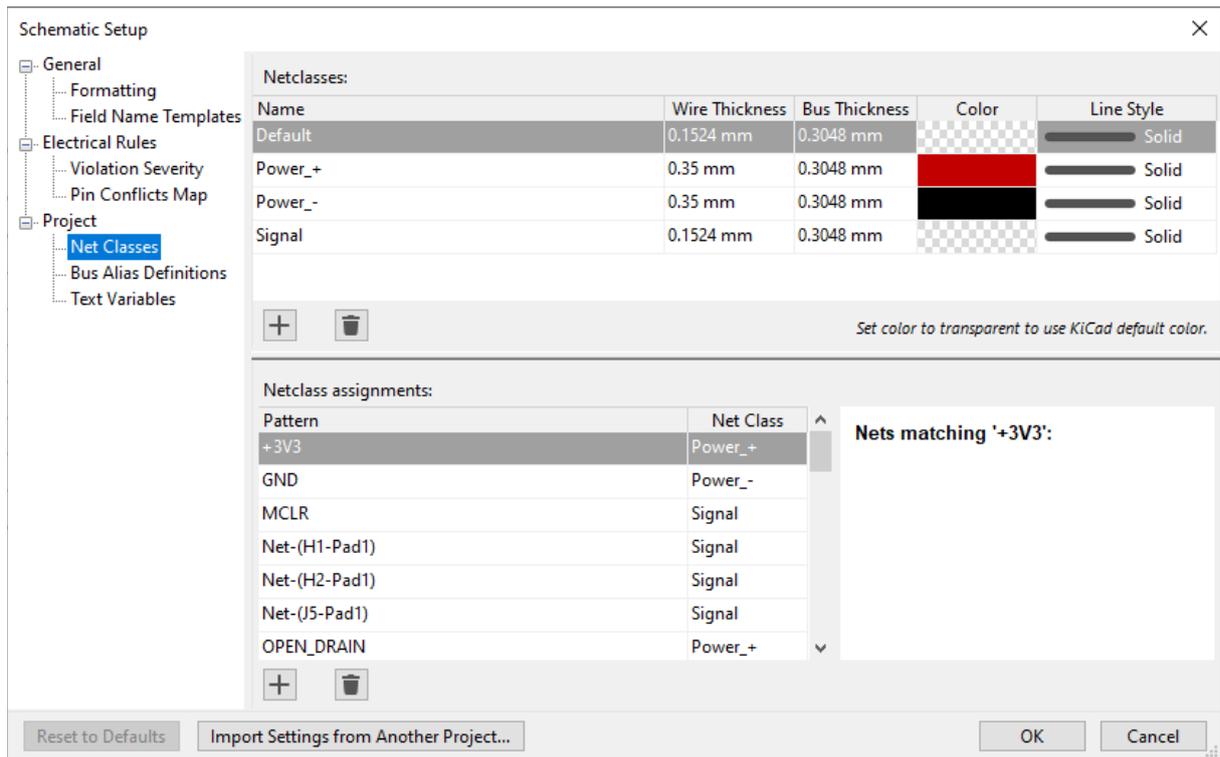


Figura 1: Finestra di dialogo per impostare le Net Classes.

I nomi delle classi create sono visibili al livello del PCB Editor, per questo è necessario crearle a livello di schema elettrico.

Una volta creati i nomi per le classi, è possibile associarli alle diverse linee elettriche dello schema elettrico, come mostrato in Figura 2. Basta selezionare il nome della classe, e nel menu a tendina selezionare il nome appropriato.

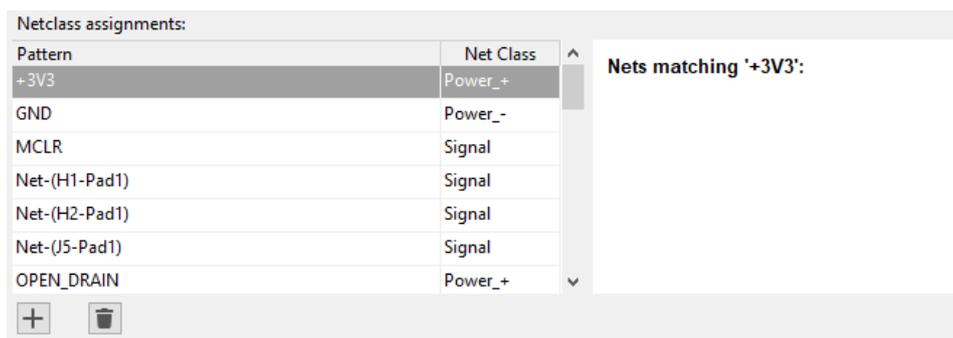


Figura 2: Finestra di dialogo per impostare Net Classes.

Per poter assegnare una pista dello schema elettrico ad una *Net Class*, è necessario assegnare un nome alla linea elettrica. Il nome viene automaticamente assegnato qualora si faccia uso delle etichette globali:



In alternativa si può assegnare un nome per mezzo “*Add a Net label*”:

A

Un esempio di schema con linee elettriche con nome assegnato è mostrato in Figura 3.

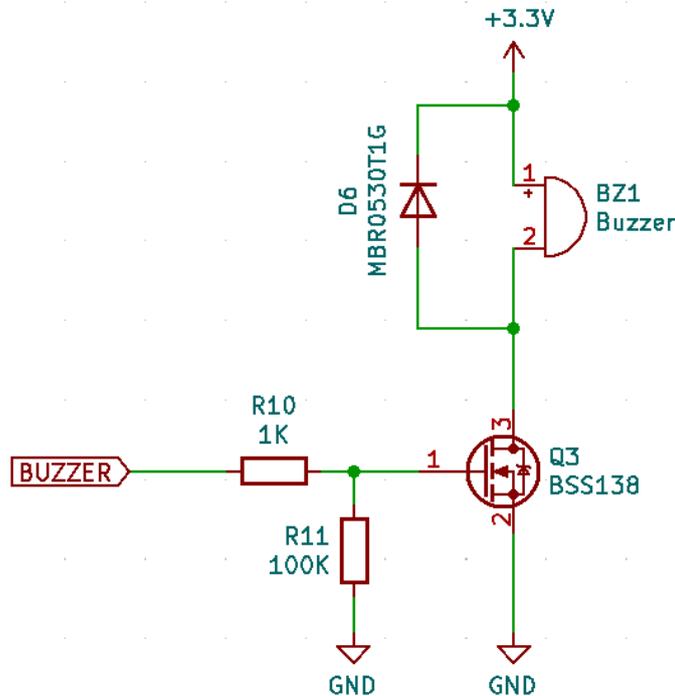


Figura 3: Schema elettrico con piste con diverso nome.

Una volta impostate le caratteristiche delle classi, lo schema elettrico viene aggiornato. Un esempio di linee con caratteristiche differenti (tratto, colore, spessore) è mostrato in Figura 4.

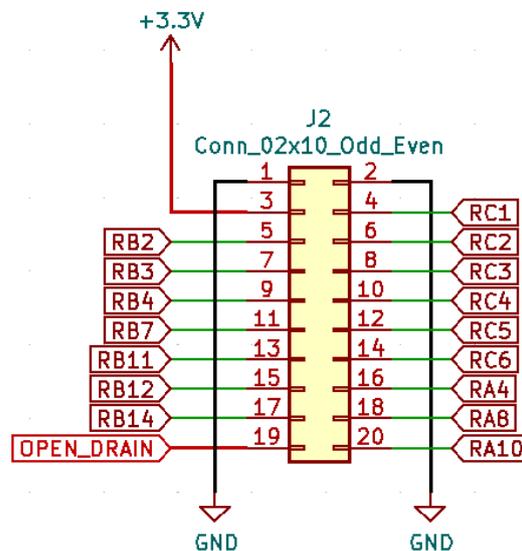


Figura 4: Esempio di linee elettriche con caratteristiche diverse.

La procedura appena descritta potrebbe essere tediosa se la si dovesse ripetere per ogni progetto. Per tale motivo è presente l'opzione per importare tali parametri da un altro progetto per il quale è stato fatto un lavoro simile. In particolare per importare le impostazioni da un altro progetto, bisogna premere il tasto di Figura 5.

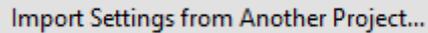
A rectangular button with a light gray background and a thin border. The text "Import Settings from Another Project..." is centered in a dark gray font.

Figura 5: Importare le impostazioni da un altro progetto.

La funzione importa, permette di importare diverse caratteristiche e impostazioni da un progetto preso come riferimento. I parametri da importare possono essere selezionati dalla finestra di dialogo di Figura 6.

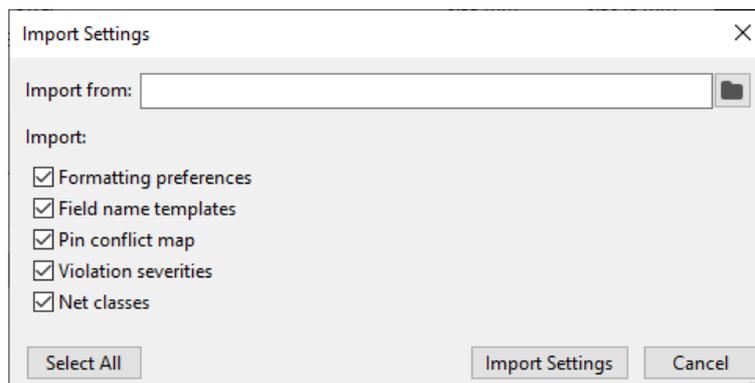


Figura 6: Selezione dei parametri da importare.

Ogni progetto è in generale però unico, per cui alcune delle impostazioni importate potrebbero dover essere cambiate.

Linee differenziali

Negli esempi precedenti abbiamo semplicemente assegnato una Classe ad una linea elettrica. Nel caso di linee differenziali, come per esempio la connessione dati USB tra un microcontrollore e il connettore, è necessario mantenere le proprietà differenziali della linea. Per fare questo dal lato PCB Editor ci sono degli strumenti che ci vengono in aiuto, ciononostante, anche in questo caso per poter utilizzare gli strumenti di supporto, è necessario iniziare dallo schema elettrico. Supponiamo di voler realizzare un semplice PCB con un connettore USB e la possibilità tramite cavo di collegarsi altrove. L'esempio è semplice e non prende in considerazione le problematiche della scelta migliore del cavo o eventuale aggiunta di linee di massa per limitare i disturbi e mantenere l'impedenza del cavo controllata. Nell'esempio si considera solo il caso di voler collare due componenti per mezzo di un bus differenziale, in particolare il caso di una connessione USB. Lo schema elettrico di esempio è mostrato in Figura 7.

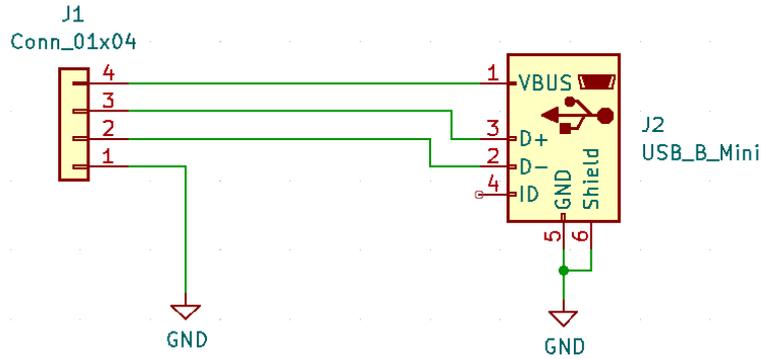


Figura 7: Esempio di utilizzo del bus differenziale USB.

Se dovessimo utilizzare lo strumento delle linee differenziali del PCB Editor, sotto il menu:

```
Route → Route Differential Pair
```

Si avrebbe l'errore di Figura 8.

✘ Unable to find complementary differential pair nets. Make sure the names of the nets belonging to a differential pair end with either N/P or +/-.

Figura 8: Errore nell'utilizzo dello strumento per tracciare linee differenziali.

Per utilizzare lo strumento nel PCB Editor, bisogna chiamare le linee differenziali in maniera opportuna. Lo schema elettrico deve essere aggiornato assegnando un'etichetta opportuna alle linee assegnate al bus USB, nominate D+ e D-. Per fare questo, come suggerito dall'errore stesso, le linee elettriche devono essere nominate D_+ e D_- oppure D_N e D_P.

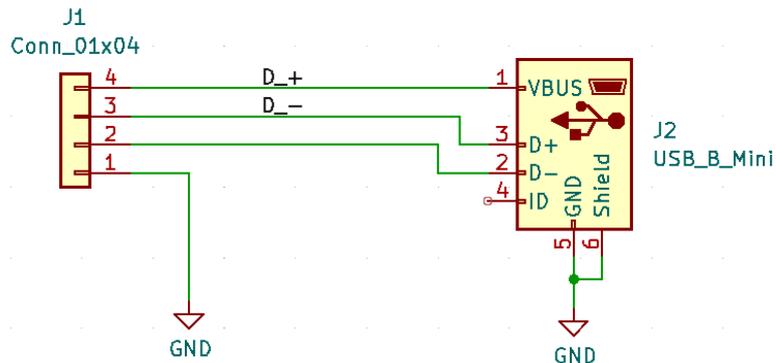


Figura 9: Esempio di utilizzo del bus differenziale USB – aggiornato.

Dal PCB Editor, aggiornando il PCB premendo:



e ripetendo l'operazione del menu *Route Differential Pair*, si ha che lo strumento funzionerà correttamente e lo sbroglio delle linee D₊ e D₋ avviene in contemporanea, come mostrato in Figura 10.

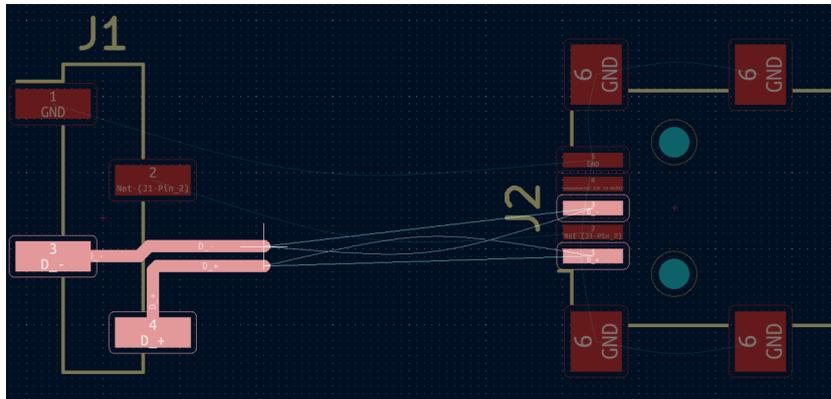


Figura 10: Esempio di utilizzo del bus differenziale USB – aggiornato.

A sbroglio terminato, le piste sono come mostrato in Figura 11.

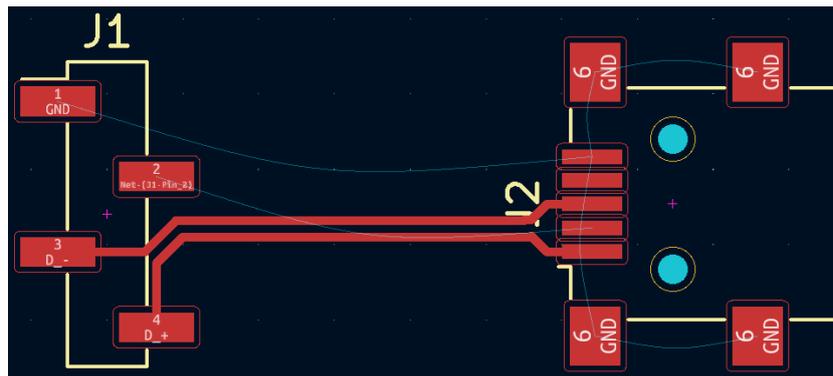
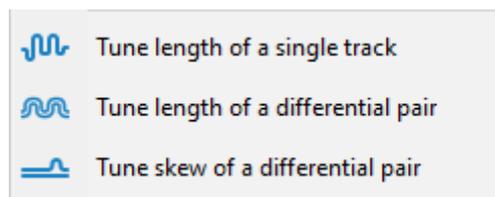


Figura 11: Esempio di linee differenziali terminate.

Le linee differenziali, sono un poco più laboriose di quanto appena mostrato, in particolare devono essere della stessa lunghezza, e quando ci sono più coppie è necessario che tutte le coppie abbiano la stessa lunghezza. Il connettore J1 scelto nell'esempio è di proposito non ottimale visto l'asimmetria scelta per le linee D₊ e D₋, ma per lo scopo si prestano per essere aggiustate per mezzo degli strumenti del Menu *Route*:



In particolare, per allungare la pista in basso (D₋) che risulta più corta, si può usare la funzione *Tune skew of a differential pair*.

La Figura 12 mostra il dettaglio di come sia aggiunta una curvatura per allungare il percorso.

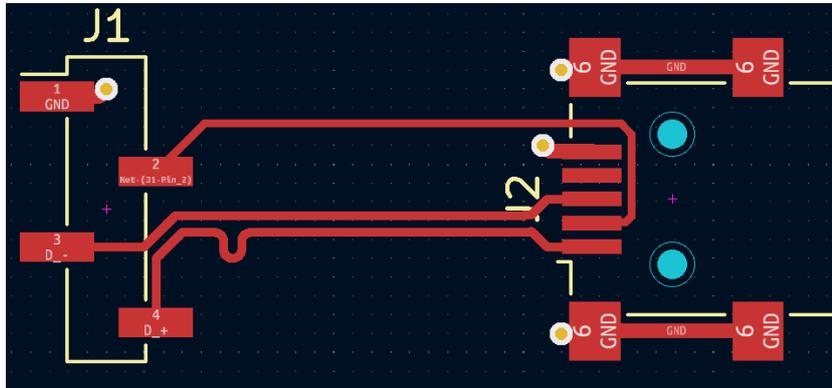


Figura 12: Esempio di linee differenziali con Skew corretto.

L'asimmetria aggiunta per correggere lo *Skew* aggiunge un errore nell'impedenza differenziale, per cui bisogna valutare i benefici e possibili problemi derivanti da questo. Ad alte frequenze la soluzione migliore sarebbe stata quello di usare un connettore J1 simmetrico, al fine di permettere un layout con piste della stessa lunghezza, senza dover apportare correzioni. Da un punto di vista pratico entrambi i layout proposti avrebbero probabilmente funzionato per lo standard USB 2.0. Però solo misure idonee sullo *Skew* possono verificare questo e non l'occhio o l'esperienza.

Nel caso di più coppie di piste differenziali, si viene spesso ad avere l'esigenza di correggere la lunghezza di qualche coppia. Questo è necessario se le varie coppie non possono seguire lo stesso percorso. Un semplice esempio potrebbe essere il caso in cui si voglia collegare un connettore a più uscite LVDS (*Low Voltage Differential Signal*) di una FPGA, associate ad un bus dati.

A scopo solo illustrativo, dal momento che nell'esempio sia ha una sola coppia differenziale, per cui non necessario, l'effetto di correggere la lunghezza si presenta come in Figura 13.

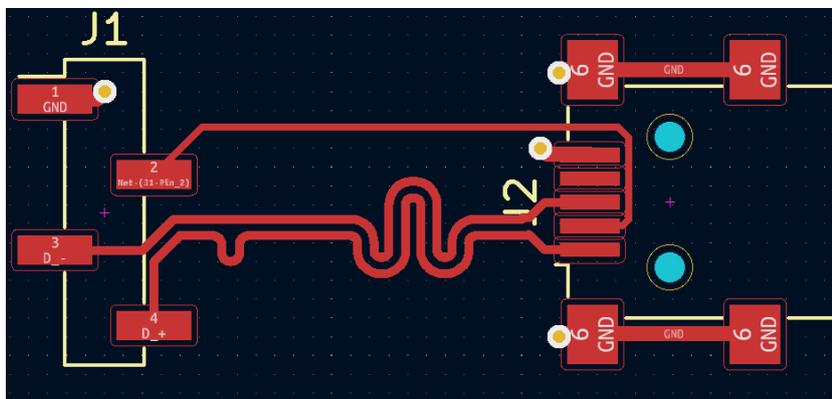


Figura 13: Esempio di linee differenziali con lunghezza corretta.

La traccia a serpente aggiunta permette di mantenere le piste con un buon accoppiamento differenziale, e la lunghezza aggiunta è la stessa per entrambe, per cui sono si soffre delle

problematiche in cui si modifichi una sola traccia.

Come si fa a conoscere la lunghezza della pista? Basta selezionare con un click la pista e vedere le informazioni in basso alla finestra di lavoro dell'IDE.

Type Track	Net /D_+	Resolved Netclass Data	Layer F.Cu	Width 12.00 mils	Segment Length 135.00 mils	Routed Length 965.62 mils	Min Clearance: 7.87 mils (from netclass 'Data')	Width Constraints: min 7.87 mils (from netclass 'Data' (diff pair))
---------------	-------------	---------------------------	---------------	---------------------	-------------------------------	------------------------------	--	--

L'informazione *Segment Length* è relativa al solo segmento selezionato mentre *Routes Length* è la lunghezza totale della traccia sbrogliata.

PCB Editor

Gran parte delle impostazioni mostrate fino ad ora, sono state a livello dello schema elettrico. Per le linee differenziali si sono già mostrati alcuni dettagli di come alcune caratteristiche si riflettano dal lato del PCB Editor. Vediamo ora qualche dettaglio aggiuntivo da ritenersi valido sia per le linee di segnali standard, linee di alimentazione o linee differenziali.

Tutte le classi che si sono generate dal lato dello schema elettrico sono automaticamente importante dal lato PCB Editor. Per mostrare le classi disponibili bisogna selezionare la voce della Toolbar *Edit board Setup*:



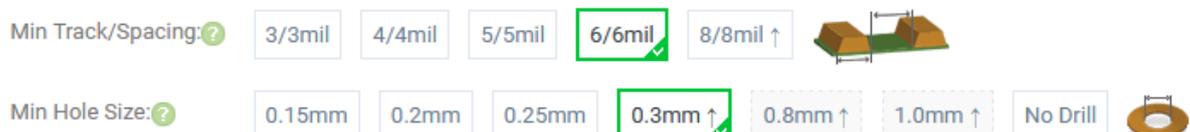
e selezionare la voce *Net Classes*, come mostrato in Figura 14. In questo caso la tabella delle classi riporta nuovi parametri associati alle piste del PCB e non più dello schema elettrico.

In particolare tra i vari parametri di maggior interesse:

- Clearance: è la distanza tra due piste.
- Track Width: larghezza della pista.
- Via Size: diametro dei via sulla traccia.
- Via Holes: fori dei via.
- DP Width: larghezza della pista *Differential Pair* (linea differenziale).
- DP Gap: distanza tra le piste differenziali.

Questi parametri devono essere aggiornati per riflettere quelli supportati dal produttore del PCB.

In particolare PCBWay supporta:



I valori standard delle classi rientrano nei valori supportati anche nell'offerta a basso costo dei PCB. In ogni modo è bene effettuare un controllo ed adattare i valori alle proprie esigenze.

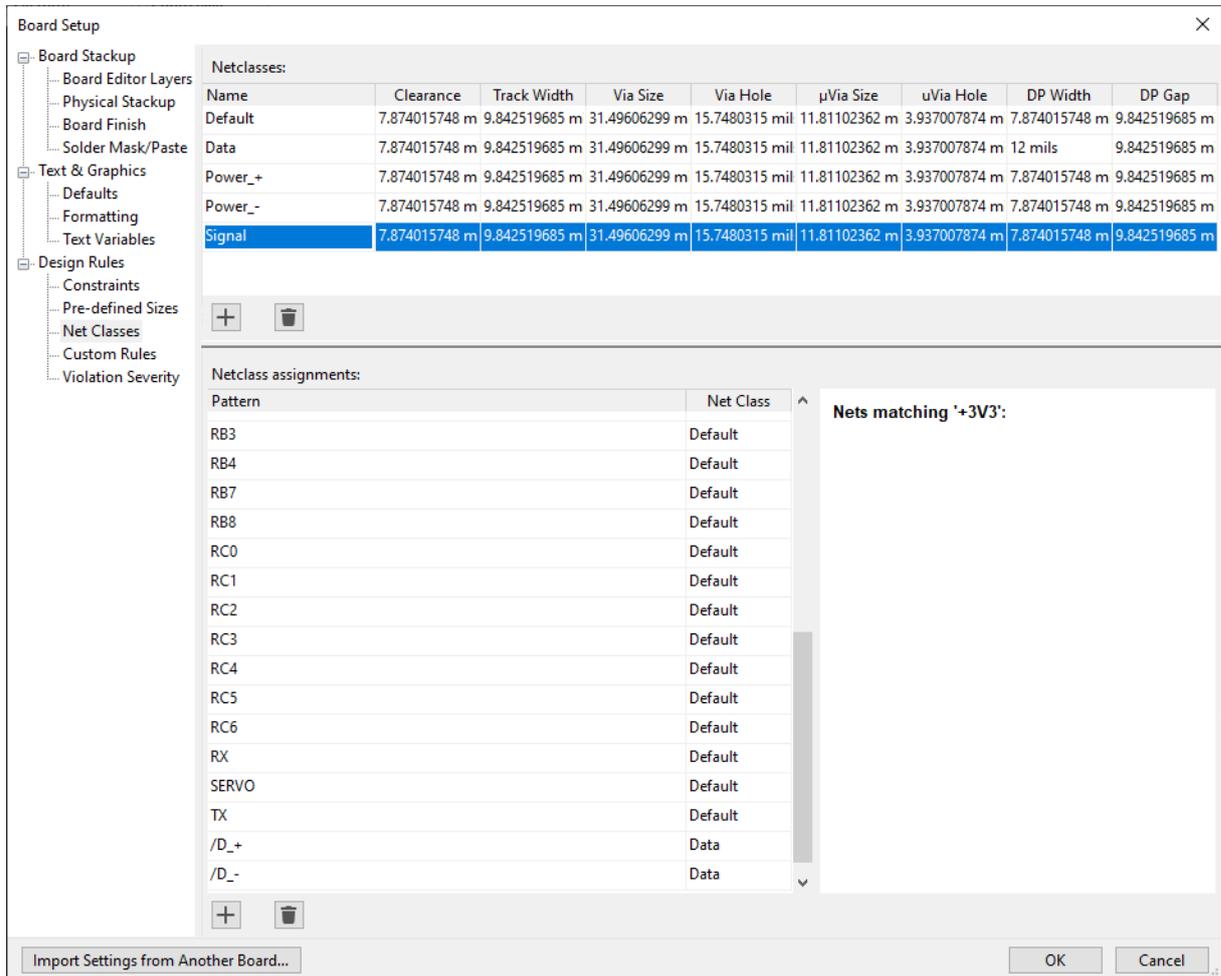


Figura 14: Net Classe dal lato PCB Editor.

L'aver creato le classi e aver assegnato una larghezza alle piste, torna utile durante la fase dello sbroglio di ogni pista. Nel primo esempio mostrato nel corso (Capitolo 3) si sono aggiunte delle piste al menu a tendina della Toolbar orizzontale, come mostrato in Figura 15. Per ogni pista si selezionava la larghezza e si procedeva allo sbroglio.

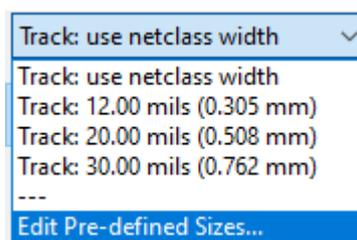
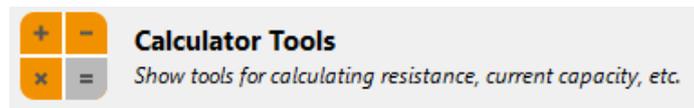


Figura 15: Net Larghezze piste aggiunte manualmente.

La prima voce della tendina, offre la possibilità di usare la *Netclass width*, per cui la larghezza viene selezionata in automatico e prelevata dalla *Net Class* di appartenenza. Se

una linea elettrica non viene assegnata a nessuna classe manualmente, appartiene comunque a quella di Default, per cui ogni pista avrà comunque un valore assegnato.

Dover assegnare la larghezza giusta è spesso legata alla corrente che le tracce devono supportare. Uno strumento utile offerto da KiCad è il *Calculator Tool*, che è possibile eseguire direttamente dalla finestra principale del progetto di KiCad sul quale si sta lavorando. Basta premere l'icona



La finestra di dialogo che si apre, è mostrata in Figura 16. In particolare sulla sinistra è possibile selezionare diversi strumenti. In Figura 16 è mostrato quello relativo alla larghezza della traccia sul PCB.

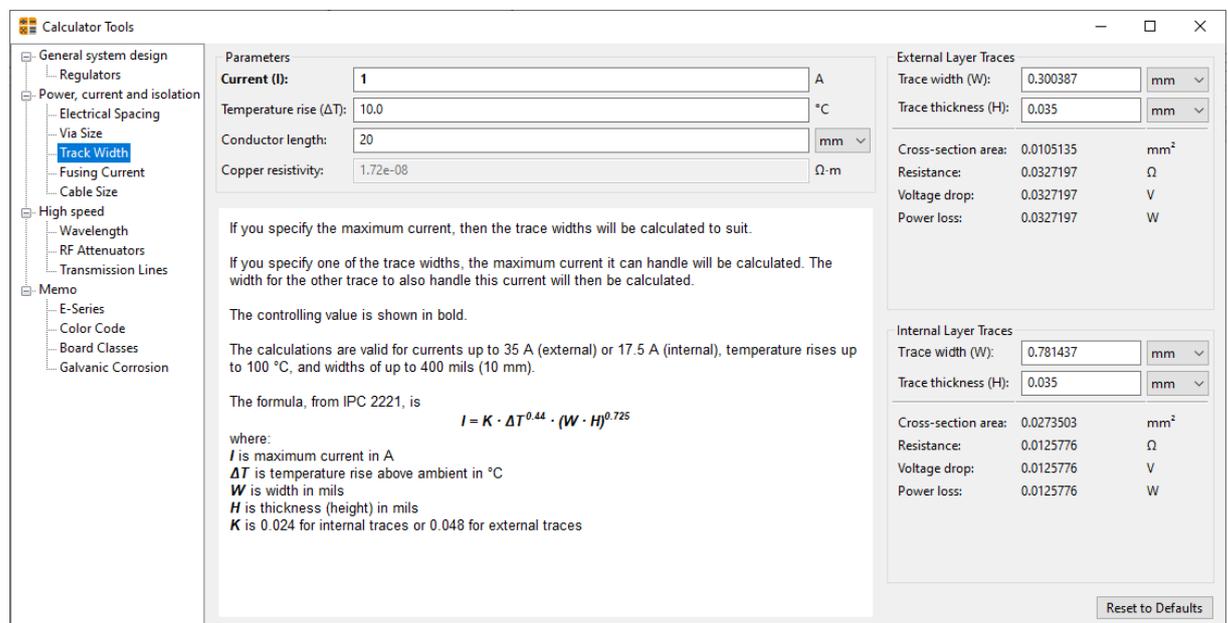


Figura 16: Finestra di dialogo degli strumenti KiCad.

Lo strumento applica la formula dello standard IPC 2221 e riporta i vari parametri utilizzati.

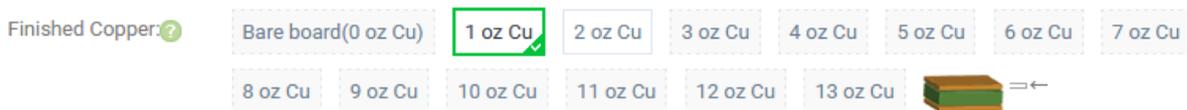
In particolare i campi in sfondo bianco possono essere aggiornati manualmente, per cui si può scrivere la corrente che si vuole supportare e si ha come risultato la larghezza della pista. In alternativa, scrivendo la larghezza della pista, viene aggiornato il campo di corrente massima.

Gli altri campi con sfondo grigio, sono aggiornati di conseguenza, mostrando alcune caratteristiche della pista che si otterrebbe.

Tra i parametri importanti che permettono di avere piste più fine che supportano correnti maggiori, ci sono la temperatura massima che si vuole supportare a causa della corrente

che circola, e lo spessore della pista stessa. In particolare i 10°C rappresentano un delta, ovvero un aumento di temperatura rispetto a quella ambientale. In base alle caratteristiche del PCB e delle specifiche di sistema, si possono o meno accettare delta maggiori. La temperatura ambientale potrebbe essere molto maggiore di quella reale, nel caso in cui la pista sia vicino ad un componente che scaldi. Per esempio se la stanza è a 30°C ma il PCB ha dei componenti caldi a 60°C , la pista impostata come in Figura 16, si troverebbe ad avere probabilmente una temperatura vicino a 70°C . Queste sono attenzioni particolari che bisogna avere durante la fase di progettazione e che rendono la realizzazione del PCB più complessa del semplice collegare due punti A e B assieme. Per limitare i problemi termici, visto che potrebbe essere difficile prevedere tutti i casi, si fa spesso un'immagine termica del sistema (una volta realizzato il prototipo), al fine di vedere gli *hotspot*, ovvero punti caldi.

Il parametro relativo allo spessore del rame del PCB, comune a tutte le piste, lo si può impostare durante la fase in cui si inviano i Gerber files. In particolare PCBWay supporta i seguenti valori:



Il valore è spesso fornito in *once* per metro quadro. 1 oz Cu equivale a 0.035mm , ovvero $35\mu\text{m}$. 2 oz Cu a $70\mu\text{m}$ e via dicendo.

Nel caso delle linee differenziali il problema della corrente non è il principale parametro da tenere a mente. Spesso i segnali differenziali hanno ampiezze dell'ordine di 100mV e devono fornire corrente a un carico di 100Ω . Per cui si parla di correnti dell'ordine del mA. Utilizzando lo strumento mostrato in Figura 16 si otterrebbero piste sufficienti a trasportare tale corrente, dell'ordine del μm . In realtà le piste differenziali sono molto più ampie di questo valore.

Da un punto di produzione del PCB le piste minime sono dell'ordine di 3mil, ovvero $76\mu\text{m}$. Questa larghezza viene fornita a costi aggiuntivi visto le attenzioni da porre e la possibilità che alcuni PCB con piste rotte non passino il test di conduttività (eseguito in produzione del PCB) e debbano essere gettati. Per questa ragione spesso, sono direttamente prodotti alcuni PCB in più. Questo viene fatto anche per PCB a 4 layers e piste con larghezza standard. Se non ci sono problemi, non è insolito ricevere a costo zero dei PCB aggiuntivi oltre a quelli ordinati.

Il parametro principale delle piste differenziali è l'impedenza, che spesso deve essere controllata e proprio pari al carico da controllare di 100Ω o 50Ω . Per fare questo devono avere un certo spessore ed essere ben accoppiate ad un piano di massa, per evitare di doverle fare troppo larghe. Per queste ragioni si fa uso spesso di PCB a 4 layer, al fine di garantire che le piste differenziali abbiano un piano di massa vicino con il quale i campi magnetici ed elettrici si possano accoppiare. KiCad, anche in questo caso, tra gli strumenti offre lo strumento *Transmission Lines*, per determinare la larghezza idonea delle piste. In particolare supporta diversi tipi di linee di trasmissione, come mostrato in Figura 17.

PCBWay offre anche uno strumento simile che può essere utilizzato online ([Link](#)). I valori ottenuti con i diversi strumenti possono differire a seconda del modello matematico utilizzato. In particolare sono presenti diversi modelli anche in base alla frequenza operativa massima di interesse. Questi dettagli non sono sempre visibili nei vari calcolatori disponibili, per cui bisogna fare attenzione. I modelli migliori sono comunque quelli basati sul calcolo del campo elettrico e magnetico, e dal valore dei due viene calcolata l'impedenza locale della traccia. In entrambi gli esempi di KiCad e PCBWay sono utilizzati semplici modelli matematici. Per il calcolo dell'impedenza caratteristica bisogna inserire le proprietà elettriche del materiale, in particolare la costante dielettrica. Questa può variare da produttore a produttore. Nel caso di PCBWay il valore tipico è 4.3 e può essere trovata al seguente [link](#).

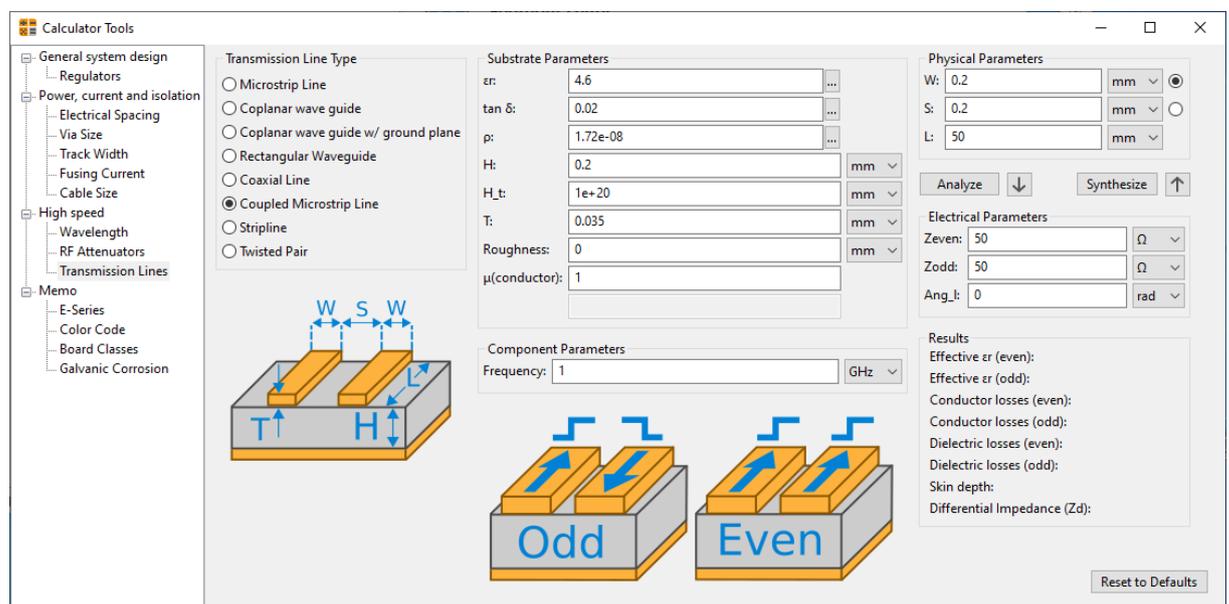


Figura 17: Finestra di dialogo degli strumenti KiCad – Transmission Lines.

Nel caso in cui si voglia realizzare una pista con controllo di impedenza, tali strumenti possono andare bene per valori sommari. In sistemi professionali in cui si fa uso di FPGA è bene far uso del servizio “*Impedance control*” del produttore dei PCB. Questo può essere selezionato durante la fase in cui si caricano i file Gerber del progetto, tra i servizi aggiuntivi offerti, come mostrato in Figura 18.

Considerando l'importanza dell'*Impedance Control*, se si attiva questo servizio è sempre bene contattare il produttore di PCB per essere certi dei parametri elettrici del PCB utilizzato. Tipicamente per il calcolo provvisorio delle piste che richiedono l'impedenza controllata, si può far uso degli strumenti precedentemente descritti, ma alla fine il produttore del PCB verifica nuovamente gli stessi e li adatta durante la fase di produzione. In particolare, a fine produzione, si può avere anche il controllo, ovvero verifica, dell'impedenza delle tracce di interesse. Questi servizi vengono naturalmente offerti ad un costo aggiuntivo, visto il costo degli strumenti utilizzati e del tempo necessario per la verifica sia nella misura che da parte dell'operatore che la effettua.

— Customized Services and Advanced Options (Castellated holes,Edge Plating,impedance control...) Hide ^

We may add extra cost for these special options which will be confirmed after review.

Peelable Soldermask: Hole copper thickness:

UL Marking: Date Code:

<input type="checkbox"/> Half-cut/Castellated Holes	<input type="checkbox"/> Edge Plating	<input checked="" type="checkbox"/> Impedance control
<input type="checkbox"/> Halogen-Free	<input type="checkbox"/> Custom Stackup	<input type="checkbox"/> Carbon ink
<input type="checkbox"/> All vias filled with resin and capped	<input type="checkbox"/> Via in pad	<input type="checkbox"/> Press-fit holes
<input type="checkbox"/> Countersink/Counterbore	<input type="checkbox"/> Z-axis milling	<input type="checkbox"/> Black FR4 (black core)
<input type="checkbox"/> Embedded Copper PCB	<input type="checkbox"/> Embedded Capacitor/Resistor PCB	<input type="checkbox"/> Cavity PCB
<input type="checkbox"/> Semi-Flex PCB	<input type="checkbox"/> Whole/Partially Hybrid PCB	<input type="checkbox"/> Back Drill PCB
<input type="checkbox"/> Leadless Partially Plated Hard Gold		

Figura 18: Servizio aggiuntivo Impedance Control.

Conclusioni

In questo Capitolo abbiamo visto alcuni dettagli di come scegliere le dimensioni fisiche delle tracce del PCB relative alle diverse linee elettriche dello schema elettrico. In particolare, partendo dallo schema elettrico abbiamo raggruppato le linee elettriche in *Net Classes* e sfruttato questo raggruppamento dal lato del PCB Editor per definire diverse larghezze delle piste a seconda della corrente necessaria. Si sono visti alcuni dettagli delle piste differenziali come per il bus USB e la necessità di avere nomi specifici per le linee elettriche dal lato dello schema elettrico. In ultimo si è mostrato come la corrente sulle piste non sia l'unico parametro da tenere a mente per determinare la larghezza delle stesse, infatti se la traccia sul PCB è una linea di trasmissione, sono necessari altri accorgimenti. KiCad, offre in ogni modo sia per la corrente che per le linee di trasmissione, uno strumento di calcolo ad hoc.

In ultimo, il Capitolo, mostra come ignorare alcuni aspetti tecnici potrebbe portare ad impostare i parametri di una pista in maniera errata. A livello di sistema questo potrebbe compromettere l'integrità del segnale elettrico che usa la pista, portando errori di comunicazione. Nei casi peggiori una pista dimensionata in maniera errata potrebbe portare alla rottura della stessa.

Bibliografia

[1] www.LaurTec.it: sito dove scaricare la guida KiCad e gli altri capitoli associati al corso.

[2] www.PCBWay.com: Sponsor ufficiale del corso.

[3] **PCBWay**: strumento online per il calcolo delle dimensioni meccaniche delle linee di trasmissione ([Link](#))

History

Data	Versione	Autore	Revisione	Descrizione Cambiamento
14.06.23	1.0	Mauro Laurenti	Mauro Laurenti	Versione Originale.