



UNIVERSITÀ DI PISA

COSTRUZIONI ELETTRONICHE

Prof. Roberto Roncella

Corso di laurea in Ingegneria Elettronica
Appunti sbobinati del corso

Questi appunti rispecchiano piuttosto fedelmente il livello di dettaglio che viene seguito durante le lezioni, e costituiscono un ausilio didattico allo studio.

Tuttavia, è importante chiarire che gli appunti non vanno intesi come sostitutivi né del libro di testo né della frequenza alle lezioni, che rimangono fattori fondamentali per una buona preparazione dell'esame.

Polito Emmanuele

COSTRUZIONI ELETTRONICHE

REGISTRO DELLE LEZIONI ANNO ACCADEMICO 2012/2013

1. [Lun 04/03/2013 10:30-11:30](#) (1:0 h) lezione: Presentazione del docente. Introduzione al corso. Obiettivi formativi. Breve descrizione dei contenuti principali. Modalità di verifica. Logistica del corso. (Roberto Roncella)
2. [Mar 05/03/2013 13:30-15:30](#) (2:0 h) lezione: CAD per il disegno di schemi elettrici. Simboli e connessioni. Proprietà dei simboli; pin. Numero, nome, forma, tipo. Verifica del progetto elettrico. Connessioni con fili, bus e etichette. Visibilità dei vari tipi di etichetta. (Roberto Roncella)
3. [Mer 06/03/2013 16:30-18:30](#) (2:0 h) lezione: Schemi elettrici di sistemi complessi. Fogli di grande formato e schemi gerarchici. Riutilizzo e modularità. Selezione dei componenti. Identificazione del componente e del package. Categorie di componenti. (Roberto Roncella)
4. [Lun 11/03/2013 10:30-11:30](#) (1:0 h) lezione: Proseguimento della panoramica sulla selezione dei componenti. Impostazione di una metodologia per la selezione dei componenti. Parametri di identificazione, di vincolo e di qualità. Combinazione dei parametri per ottenere un funzionale da massimizzare. Parametri economici. Strumenti per la selezione forniti dai produttori di componenti. (Roberto Roncella)
5. [Mar 12/03/2013 13:30-15:30](#) (2:0 h) laboratorio: Presentazione dell'ambiente KiCAD. Creazione di progetti e applicativo EESchema. Disegno di due schemi su singola pagina. Annotazione e verifica delle regole di progetto elettriche. Presentazione di un schema complesso strutturato gerarchicamente (ECG). Prima assegnazione dei progettini. (Roberto Roncella)
6. [Mer 13/03/2013 16:30-18:30](#) (2:0 h) lezione: Analisi degli strumenti di selezione messi a disposizione dai produttori e dai distributori di componenti elettronici. La selezione dei resistori. Parametri di identificazione, di vincolo e di qualità. Numeri preferiti. Potenza media e istantanea. Impulsi normalizzati. Coefficiente di temperatura. (Roberto Roncella)
7. [Lun 18/03/2013 10:30-11:30](#) (1:0 h) lezione: Selezione dei resistori. Stabilità. Tecnologie realizzative. Resistori a film, a impasto e a filo. Caratteristiche salienti di ogni tecnologia. Modello equivalente del resistore reale. (Roberto Roncella)
8. [Mar 19/03/2013 13:30-15:30](#) (2:0 h) laboratorio: Realizzazione con il software EESchema di schema elettrico complesso. Uso di descrizione e label gerarchiche. Power label: definizione e uso. Creazione di nuovi simboli e gestione delle librerie. (Roberto Roncella)
9. [Mer 20/03/2013 16:30-18:30](#) (2:0 h) lezione: Condensatori e caratteristiche salienti in funzione della tecnologia realizzativa. Parametri di vincolo e di prestazione. Condensatori elettrolitici al tantalum e agli ossidi di alluminio. Condensatori a doppio strato, supercondensatori. Condensatori a film e ceramici con alto e basso k. Modello elettrico equivalente. Relazione tra volume ed energia. (Roberto Roncella)
10. [Lun 25/03/2013 10:30-11:30](#) (1:0 h) lezione: Induttori. Caratteristiche e parametri identificativi e di qualità. Induttori in aria e con materiale ferromagnetico. Importanza del traferro. Non linearità negli induttori. Modello elettrico equivalente. (Roberto Roncella)
11. [Mar 26/03/2013 13:30-15:30](#) (2:0 h) laboratorio: Completamento dello schema elettrico dell'ECG. Annotazione, verifica delle regole di progetto elettrico ed estrazione della netlist. Inizio della ricerca presso distributori commerciali dei componenti indicati nello schema. (Roberto Roncella)
12. [Mer 27/03/2013 16:30-18:30](#) (2:0 h) lezione: Processi per la realizzazione di PCB. Laminazione. Uso di preimpregnati e resine. Tecniche di definizione fotolitografiche delle geometrie delle connessioni. Fotoresist, impressione, sviluppo, attacco acido. Foratura. Metallizzazione chimica e elettrolitica. Fresatura. Solder resist e silk screen. CAD per il progetto geometrico di PCB. Placement e routing. Algoritmi di P&R. Verifica delle regole di layout. (Roberto Roncella)
13. [Lun 08/04/2013 10:30-11:30](#) (1:0 h) lezione: Descrizione dei passi di processo per una semplice tecnologia a singola e doppia faccia. Problema della metallizzazione dei fori. Tecnologie per fast prototyping. Sistemi di trasferimento diretto delle maschere. (Roberto Roncella)
14. [Mar 09/04/2013 13:30-15:30](#) (2:0 h) laboratorio: Completamento del reperimento dei componenti usati per lo schema dell'ECG. Reperimento dei data-sheet. Valutazione dell'impronta dei componenti e verifica della disponibilità dei relativi moduli in libreria. Associazione del footprint allo schema. (Roberto Roncella)
15. [Mer 10/04/2013 16:30-18:30](#) (2:0 h) lezione: Un esempio significativo di tecnologia per PCB disponibile sul territorio. Analisi critica delle regole di layout proposte. Resa e collaudo elettrico delle schede nude. Regole intra-layer e inter-layer. Vie metallizzate passanti e cieche. (Roberto Roncella)
16. [Lun 15/04/2013 10:30-11:30](#) (1:0 h) lezione: Conclusione dell'analisi di un esempio significativo di tecnologia per PCB disponibile sul territorio. Piani di massa. Il problema dello "scarico termico" e della sua applicazione per facilitare la saldatura. Regole sulla foratura ed effetto delle metallizzazioni sui diametri di foratura. (Roberto Roncella)
17. [Mar 16/04/2013 13:30-15:30](#) (2:0 h) laboratorio: Progetto geometrico corrispondente allo schema ECG. Realizzazione dei footprint per i componenti particolari, non rappresentati nella libreria standard. Impostazione delle regole di DRC. (Roberto Roncella)
18. [Mer 17/04/2013 16:30-18:30](#) (2:0 h) lezione: Non idealità presenti nel progetto geometrico. Analisi dell'effetto dei parametri parassiti nel progetto geometrico. Resistenza, capacità e induttanza di una pista. Condizioni per la loro significatività. (Roberto Roncella)

19. [Lun 22/04/2013 10:30-11:30](#) (1:0 h) lezione: Problematiche di compatibilità elettromagnetica e integrità dei segnali. Crosstalk dovuti a mutua capacità e mutua induttanza. Crosstalk dovuto all'impedenza dei tratti a comune dell'alimentazione. Condensatori di filtraggio sull'alimentazione. (Roberto Roncella)
20. [Mar 23/04/2013 13:30-15:30](#) (2:0 h) laboratorio: Completamento della documentazione e dei dati di progetto dell'ECG. Estrazione dei file per la produzione del PCB. Realizzazione dei report. (Roberto Roncella)
21. [Mer 24/04/2013 16:30-18:30](#) (2:0 h) lezione: Linee di trasmissione. Modello a parametri distribuiti. Resistenza, capacità e induttanza per unità di lunghezza. Equazione dei telegrafisti. Forma della soluzione con onda progressiva e regressiva. Velocità di propagazione dell'onda. Impedenza caratteristica. Concetto di lunghezza efficace e criterio per l'uso dei parametri concentrati. (Roberto Roncella)
22. [Lun 29/04/2013 10:30-11:30](#) (1:0 h) lezione: Linee di trasmissione in regime sinusoidale. Soluzione delle equazioni differenziali fondamentali in regime sinusoidale. Valutazione del rapporto tra ampiezza della componente progressiva e quella regressiva. Valutazione dell'impedenza vista. Casi particolari di linea adattata, aperta e in corto circuito. (Roberto Roncella)
23. [Mar 30/04/2013 13:30-15:30](#) (2:0 h) laboratorio: Consegna dei files finali relativi all'ECG proposto. Approfondimento sui progettini. Architetture e definizione delle specifiche. Scelta dei componenti. (Roberto Roncella)
24. [Lun 06/05/2013 10:30-11:30](#) (1:0 h) lezione: Realizzazione su PCB di linee con controllo dell'impedenza caratteristica. Effetto delle dimensioni geometriche. Microstrip e strip line. (Roberto Roncella)
25. [Mar 07/05/2013 13:30-15:30](#) (2:0 h) laboratorio: Completamento del progetto dell'ECG per alcuni gruppi. Attività sui progettini assegnati. (Roberto Roncella)
26. [Mer 08/05/2013 16:30-18:30](#) (2:0 h) lezione: Aspetti termici nella costruzione elettronica. Capacità e resistenza termica. Modalità di conduzione del calore. Dimensionamento delle piste in funzione della corrente trasportata con sovratemperatura limitata. Dissipatori. (Roberto Roncella)
27. [Lun 13/05/2013 10:30-11:30](#) (1:0 h) lezione: Affidabilità dei sistemi elettronici. Definizioni. Stima dall'esperimento di tasso di guasto. Valutazione dell'affidabilità di sistemi complessi. Sistemi funzionalmente in serie e parallelo. (Roberto Roncella)
28. [Mar 14/05/2013 13:30-15:30](#) (2:0 h) laboratorio: Identificazione dei componenti per i progettini. Progetto geometrico. Realizzazione di footprint. (Roberto Roncella)
29. [Mer 15/05/2013 16:30-18:30](#) (2:0 h) lezione: Metodi progettuali per l'incremento dell'affidabilità. Collaudabilità dei sistemi elettronici. Autodiagnosi. Fault safe e graceful degradation. Fault tolerance. Importanza della ridondanza per ottenere elevate affidabilità. (Roberto Roncella)
30. [Lun 20/05/2013 10:30-11:30](#) (1:0 h) lezione: Metodo del "Gate stage" per l'analisi di affidabilità e per il conseguimento di target affidabilistici. (Roberto Roncella)
31. [Mar 21/05/2013 13:30-15:30](#) (2:0 h) laboratorio: Completamento dei progettini e prime consegne dei files di progetto e delle relative relazioni. Indicazioni sull'esecuzione della prova pratica. (Roberto Roncella)
32. [Mer 22/05/2013 16:30-18:30](#) (2:0 h) lezione: Metodi per l'incremento dell'affidabilità. Prove accelerate. Uso della Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) come strumento per la gestione dell'affidabilità in produzione. Amplificatori in classe D come esempio applicativo. (Roberto Roncella)
33. [Mar 28/05/2013 13:30-15:30](#) (2:0 h) esercitazione: Svolgimento di prova pratica con il software KiCAD. Realizzazione fino ai files per la costruzione di semplice preamplificatore stereo, linea di potenza e linee RF. (Roberto Roncella)
34. [Mer 29/05/2013 16:30-18:30](#) (2:0 h) lezione: Completamento della lettura dell'application note relativa agli amplificatori in classe D. Problematiche di compatibilità elettromagnetica e distorsione armonica totale (THD) legate al tempo morto e al tempo di ripristino dei diodi. Circuiti di pilotaggio dei MOSFET e in particolare del transistore sul lato alto. Selezione dei MOSFET. (Roberto Roncella)

CHECK LIST DI VERIFICA

CAD per la progettazione di circuiti stampati

Descrivere il flusso di progetto che dallo schema elettrico porta alla scheda elettronica.

In cosa consiste la fase di verifica dello schema elettrico (in OrCAD si chiama DRC)?

Quali elementi occorre specificare quando si disegna un simbolo? A cosa servono?

Che cosa è un footprint?

Che cosa è una rastnet e quale è la sua utilità?

Cosa vuole dire la sigla SMT? Confrontare soluzioni SMT e soluzioni through-hole.

Cosa sono gli MCM?

Vantaggi e svantaggi di soluzioni System in Package (basate su multi chip modules) rispetto a soluzioni System on Chip (basate su single chip).

Elencare caratteristiche principali dei materiali usati nei PCB.

Integrità dei segnali e problemi termici

Individuare criteri per determinare se il progetto di una scheda digitale richiede il ricorso a particolari tecniche di progettazione delle connessioni per alte frequenze.

In che modo si può migliorare l'integrità di un segnale che è instradato in linee con impedenza caratteristica nota?

Quali possono essere le fonti di interferenze elettromagnetiche in un circuito complesso?

Come si dimensiona una pista in funzione della corrente che la attraversa?

Descrivere le procedure che portano al dimensionamento di un dissipatore.

Componenti passivi

Descrivere le diverse tipologie di condensatori con riferimento alla tecnologia realizzativa e alle applicazioni.

Quali sono i parametri che definiscono una resistenza?

Che cosa è il Q di un induttore?

Transistori di potenza (bipolari e a effetto di campo)

Spiegare le diverse sezioni del data sheet di un BJT di potenza (con il data sheet a disposizione).

Spiegare le diverse sezioni del data sheet di un MOSFET di potenza (con il data sheet a disposizione).

Tiristori

Come è fatto un SCR?

Quali sono i principali parametri elettrici che ne descrivono il funzionamento?

Vantaggi e svantaggi dell'uso di SCR rispetto a transistor di potenza bipolari e a effetto di campo.

Amplificatori di potenza.

Mostrare gli schemi di principio degli amplificatori in classe A, B, C e D.

Determinare il massimo rendimento di conversione di un amplificatore in classe A.

Determinare il massimo rendimento di conversione di un amplificatore in classe B.

Esporre i principali vantaggi che presentano gli amplificatori in classe D.

Come si fa a garantire l'accensione di un MOSFET a canale n nei lati alti di un ponte alimentato ad alta tensione?

Affidabilità

Esponga una possibile classificazione dei guasti.

Su quale variabile aleatoria è costruita la teoria dell'affidabilità?

Ci faccia vedere come si valuta l'affidabilità di un sistema complesso di cui è noto lo schema di connessioni funzionali.

Come si stima il tempo di vita medio di un componente elettronico?

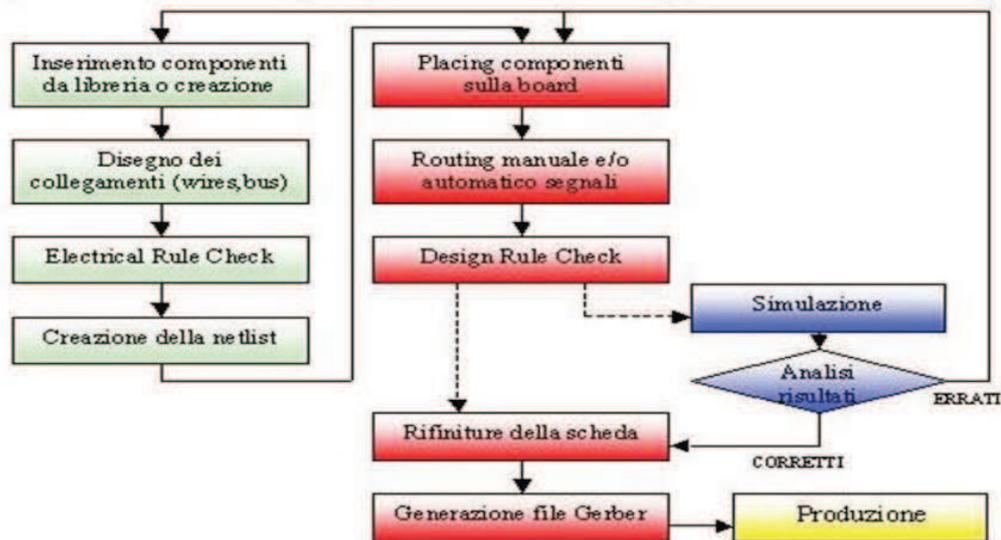
Che senso ha un MTF di 5000 anni per un transistor MOSFET?

Quali proprietà hanno i sistemi con tasso di guasto costante?

In che cosa consiste la FMEA?

IL PROGETTO ELETTRICO

Il nostro interesse è rivolto verso il CAD per il progetto elettrico. Iniziamo a descrivere l'oggetto che vogliamo realizzare tramite quest'oggetto che è lo *schema elettrico*. Vediamo quali paradigmi usa un CAD per disegnare uno schema elettrico e come utilizzarlo al meglio. La maggior parte degli oggetti elettronici vengono costruiti con un flusso di progetto come questo:



La parte verde (Progetto elettrico) è la prima parte che affronteremo. In rosso c'è il Progetto geometrico, in blu la Verifica e la Produzione in giallo. A monte di questo c'è comunque una fase di progettazione in cui si riflette sulle scelte da affrontare e mettere in pratica. Questo tipo di strumenti prevedono già l'esplicitazione delle idee del progettista nel database di progetto. I passi del progetto elettrico riguardano le operazioni con cui lo schema elettrico passa dalla mente del progettista al software, con qualche ausilio del CAD (ERC e Netlist). Col progetto geometrico si detta la struttura della rete in senso fisico geometrico e ci saranno altre rifiniture prima di avere il .gerber da mandare alle aziende di produzione. Di solito questo processo è ripetuto per prototipo, serie, pre-serie e grande serie.

Alcune delle cose che verranno illustrate sembrano banali e di facile apprendimento in maniera "learn by doing", ma i CAD non sono dei software così intuitivi e occorre capire il perché di alcune scelte (alcune sono un retaggio storico culturale).

Uno schema è costituito principalmente da una forma grafica dove sono presenti 2 tipologie di componenti:

- 1) Simboli
- 2) Interconnessioni

I simboli possono descrivere 3 cose (2 non significative per noi che non avranno un corrispondente nell'oggetto fisico): il componente quale un transistor, resistore, ecc. e ci aspettiamo una corrispondenza 1 a 1 fra l'oggetto da realizzare e schema, poi vengono rappresentati gli stimoli e l'alimentazione. Questi ultimi due oggetti non fanno parte della realtà costruttiva dell'oggetto perché fanno riferimento a una funzionalità ottenuta tramite elementi di interconnessioni. Ad esempio una batteria (se non di classe 1) è esterna alla scheda. Stessa cosa vale per gli stimoli, ad esempio un sensore esterno. Quindi noi possiamo vedere un file di spicce per la simulazione, ma non tutti gli oggetti presenti saranno poi sullo schematic per la realizzazione di un PCB. A noi basta inserire i connettori sulla scheda e fare riferimento alla realtà fisica. Le interconnessioni sono dei connettori ideali senza capacità parassite e equipotenziali. Nel disegno si trovano anche informazioni aggiuntive che danno ulteriori info su cosa viene utilizzato. Ad esempio la casa produttrice, dove recuperarlo, ecc.

Ma perché questa riflessione sulle info nel Progetto Elettrico?

È stata fatta una scelta che riserva al livello elettrico la maggior parte delle info che portano alla costruzione. Questa scelta è stata fatta da parte dei CAD. Queste info potremmo decidere di inserirle più avanti nei passi di progetto, ma se vengono inserite all'inizio si riducono al minimo gli errori provocati dal

progettista a causa delle sviste che si verificavano nel costituire i collegamenti e nel fare lo sbroglio del circuito.

In questo modo si ha una grossa liberazione del progettista che può affrontare la fase successiva di progetto in maniera più tranquilla, ma d'altra parte il progettista deve stare molto più attento in fase di ideazione, poiché uno sbaglio iniziale poi sicuramente verrà fuori nel progetto finale.

Gli schemi vengono fatti con diverse finalità:

Simulazione e Costruzione ad esempio. Ma possiamo immaginare che si segua un criterio top down in fase di progetto. Possiamo trovare schemi di massima iniziali pensati per inquadrare l'architettura per blocchi funzionali del sistema. Quali blocchi mi servono, come interagiscono, ecc. Questa analisi prevede grandi considerazioni di sistema come si fa per la progettazione di sistemi embedded dove convivono, nell'ambito dello stesso sistema, più oggetti elettronici a cui sono demandate diverse funzionalità a seconda delle specifiche richieste.

Normalmente in questa fase si fa uno schema a blocchi dove vengono attribuite le funzioni ai vari apparati. L'analisi di progetto poi richiede di entrare nei blocchi e determinare tutti i componenti e i comportamenti del sistema. Ciò che più interessa a noi è lo schema elettrico disegnato per la realizzazione e la costruzione. Se l'obiettivo è quello di fare le cose, cosa ci deve essere nello schema? Dovranno esserci info di dettaglio univoche sui componenti (devo determinare la sigla di un componente per acquistarlo)

e potranno essere di due tipi:

info sul montaggio → ad esempio se serve un dissipatore (questa info in uno schema per simulazione non c'è, ma per la produzione si).

Info sulle connessioni → è buona pratica annotare come commento info utili ad esempio se su una pista passa una corrente particolare, se un filo deve avere caratteristiche particolari, supporto, ecc.

Assodato cos'è uno schema elettrico, approfondiamo cos'è un **simbolo**: è un disegno che indica una funzionalità e l'interfaccia con cui il componente si connette agli altri. In questa categoria rientrano R,C,L,BJT,SWITCH ecc. Tutti i componenti hanno un simbolo e per evitare confusione l'IEEE ha unificato gli standard. Questo non è l'unico modo di disegnare un componente perché ad esempio non esiste il simbolo elettrico del Microcontrollore. Per oggetti complessi (PIC,FPGA ecc) la scelta tipica è un blocco con scritto il nome e i pin sulla periferia.

Il simbolo ha informazioni aggiuntive, in particolare ai pin sono associate molte proprietà da tenere presente. Una è una possibilità di identificazione. Questa possibilità di identificazione viene declinata normalmente in due accezioni:

1) identifica funzionale del pin rispetto all'oggetto (ES. sull'opAmp Vcc,Gnd,+,-)

2) attribuzione di un numero (o una lettera) con la funzione di creare una corrispondenza univoca tra quel pin e il collegamento fisico dell'oggetto reale, in modo tale che collegarsi a quel pin, vuol dire poi fisicamente attaccarsi a quel piedino.

Quindi abbiamo una funzionalità documentativa e una descrittiva.

Esistono ulteriori info molto importanti che descrivono l'estetica del progetto (che non va sottovalutata perché è un fattore discriminante per il successo di un progetto) o l'orientamento. Poi c'è un'ulteriore proprietà funzionale dei pin che viene specificata: nel nome dei Pin è insita la sua funzione però la può leggere solo l'umano, esiste poi la possibilità di attribuire al pin delle proprietà sul suo comportamento elettrico che può capire il CAD. Ad esempio possiamo dire che un pin è di IN, OUT, Alimentazione, aspetta un'alimentazione, ecc. . Queste info più grossolane possono essere usate dal CAD per fare le verifiche perciò si inseriscono. Se abbiamo due uscite collegate tra loro il CAD ci avvisa che c'è un corto, quindi con queste info che inseriamo, permettiamo al CAD di fare l'ERC.

Spesso sul CAD potremo trovarci di fronte a una dissociazione fra la funzione e l'oggetto fisico che contiene quella funzione. Caso tipico è quando l'oggetto fisico contiene più oggetti che svolgono quella funzione. In questo caso si può parlare di componente multiparte: in un package ci sono ad esempio 4 operazionali, oppure più porte in un unico circuito integrato. Come faccio a dire al mio CAD di usare un solo componente anziché di più uguali? Si usa la definizione multiparte. Di solito kicad usa una notazione così U29x (per identificare un integrato) dove a "x" si sostituisce una lettera per indicare una parte di un circuito integrato. A volte l'attribuzione di una sottoparte la può fare il cad o noi a mano. I cad più sofisticati consentono di fare componenti multiparte con parti diverse. Anche array di componenti passivi entrano nell'insieme di componenti multiparte.

elettronico, ma permettono di intervenire sulle modalità di collaudo attraverso questa matrice simmetrica.

Ci sono i tipi di pin previsti dal Kicad e a seconda della connessione (incrocio nella matrice) si possono controllare gli avvisi che darà l'ERC. Si può intervenire sulla matrice cliccando sul quadratino, ma A MIO RISCHIO E PERICOLO!!

Oltre a queste regole che sono regole di confronto punto-punto, esistono anche regole che riguardano un nodo.

Adesso occorre vedere le interconnessioni tra i simboli e i pin. Come strumenti per le interconnessioni abbiamo l'elemento più semplice che esiste che è il filo che tiro tra i vari pin. Naturalmente se devo collegare assieme tre pin, ne collego 2 e poi posso anche partire dal filo per andare verso il 3 pin. In questo caso tutti i CAD prevedono il pallino → simbolo della giunzione. Quando 2 fili si incrociano c'è da capire quando fanno contatto o meno e se l'assenza di pallino indica la presenza di contatto o meno.

Perché questo avvertimento? Se un filo che crediamo isolato passa attraverso un pin, il CAD crea il contatto elettrico anche se non c'è il simbolo del pallino. L'ERC in questi casi torna utile. Consiglio per scovare questi imprevisti: si può utilizzare l'operatore DRAG che sposta un simbolo lasciando collegate le connessioni, perciò spostando il simbolo si sposta tutto il nodo che non avevamo previsto.

Negli incroci a 3 il pallino è automatico. Questa è la modalità di connessione a filo. Se il progetto è complicato (soprattutto in caso di progetti digitali) è facile dovere spostarsi con dei BUS (ad esempio per le memorie). Quasi tutti i CAD, prevedono di accorpare i fili alla forma grafica BUS. Il BUS tipicamente è un raggruppamento di fili con la stessa funzionalità elettrica identificati da un vettore e i singoli fili si identificano variando l'indice. Si può collegare un filo con un BUS tramite un simbolo apposito chiamato BUS ENTRY. CAD più sofisticati possono raggruppare anche fili non omogenei (BUS dati, address, chip select,) e creare un Tunnel che ha un simbolo grafico più grande. Questa proprietà può far comodo se uso lo schema anche con finalità descrittivo-architeturali.

Esiste una modalità completamente diversa di collegamento: si possono effettuare connessioni per etichetta, cioè nell'ambito dello stesso foglio possiamo associare dei fili tramite etichette con lo stesso nome.

Occorre fare attenzione però alle regole di attribuzione label-filo: la label è una stringa di caratteri, ma quando disegniamo dobbiamo preoccuparci della posizione del riferimento per la label, perché potremmo avere degli avvisi di label flottante nell'ERC.

. D9

Cosa dire sull'uso della connessione per etichetta? Sicuramente per circuiti dove, ad esempio, la rete di reset o clock va connessa a molti componenti, questo tipo di connessione aumenta la chiarezza dello schema. Evita di intrecciare tanti fili. Però avremo una minore evidenza dello schema. Inoltre visto che Kicad è case sensitive potremmo creare più label senza accorgercene.

Nota Bene: c'è differenza tra una label e nome di un pin. La label ha una validità interna allo schema e riguarda le connessioni, mentre il nome del pin è una proprietà del simbolo.

Sempre nella connessione per etichetta esistono delle etichette speciali che riguardano i nodi di alimentazione. Lo facciamo anche noi quando scriviamo ad esempio Vcc per l'alimentazione nelle reti. Sono simboli grafici auto-evidenti con una label che contiene il valore della tensione. Poi c'è anche la possibilità di prevedere delle connessioni implicite: ma è discutibile come modalità di connessione ed è meglio non usarla.

Per la connessione con etichetta c'è un problema generale che è dovuto alla validità e ambito di visibilità di un'etichetta. Questo è un problema che si presenta in schemi complessi dove il disegno non entra in un solo foglio. Tipicamente il CAD ci permette l'uso di label locali e globali (con visibilità maggiore). Da progettisti è importante far sì che una label globale sia un qualcosa evidente (clock ad esempio). Questa problematica della visibilità ci permette di affrontare la problematica degli schemi complessi. Tutti gli oggetti elettronici sono relativamente complessi. Nel mondo professionale si trovano due tipi di soluzioni:

- 1) dilatate il foglio → schemi di grande formato che richiedono dei plotter di grande formato e richiedono, come le mappe di una volta, un sistema di coordinate lettera-numero che permette l'associazione di ogni componente al proprio comportamento e collocamento. Questa modalità è abbastanza antica (pre-CAD) e si usava ad esempio per i televisori. Permette di avere un'idea a colpo d'occhio del "tutto", ma è poco pratica e non permette di sfruttare al meglio la modularità che un progetto elettronico può presentare.
- 2) approccio gerarchico → Proprio per sfruttare al meglio la modularità il progettista che disegna al CAD, anche se disegna pensando al grande formato, ne disegna una porzione. Quindi si usa una struttura gerarchica di un sistema da parte del progettista, come si fa un po' con ogni progetto in C ad esempio. Questo è l'approccio più diffuso per il CAD. Quest'approccio deve creare le connessioni tra i vari livelli. Normalmente uno lavora al livello superiore e introduce i vari sottosistemi. A livello superiore il sottosistema ha un'interfaccia costituita da pin. A livello inferiore i pin vengono definiti come PORTE del sottosistema e ovviamente ogni sottosistema ha un file per conto suo. Questa è la modalità di interconnessione più esplicita, ma kicad ha una modalità interessante: quando si disegna un sottosistema di solito si disegnano prima le porte e poi vengono richiamate dal livello superiore. Poi c'è la possibilità di creare schemi indipendenti tra i vari livelli o si possono creare delle cartelle di sottosistemi con delle etichette di cartella.

Con questa visione si perde l'immediatezza della visione d'insieme, ma c'è un vantaggio che è l'ausilio in fase di progetto della creazione della struttura gerarchica, che seziona il "problemone" in più problemi minori: ad esempio ci sarà la sezione alimentazione, sensori, controllo, ecc.

Inoltre ci aiuta in altri due compiti:

- 1) la modularità: per gestire 8 problemi uguali si può creare un sottosistema e poi istanziarlo (chiamare uno schema) 8 volte.
- 2) riusabilità: nel momento in cui si va verso sottosistemi di dimensioni più piccole, è più facile individuare funzioni più generali. Ad esempio l'alimentazione. Quindi il modulo che descrive un sottosistema lo possiamo vedere come un componente che possiamo usare in altri progetti.

Nel disegno dello schema è fondamentale che ad ogni simbolo siano associate delle proprietà che ci permettono di andare avanti nei passaggi successivi del flusso di progetto. È fondamentale che nelle proprietà del simbolo ci sia un identificatore univoco. Questa proprietà si chiama valore e ci dice cos'è, ma a noi serve poter dare un nome a ogni componente univocamente. Ci sono delle prassi per dare le etichette a componenti in CAD: di norma in uno schema si usa la convenzione lettera-numero la lettera ci dà l'idea della classe a cui appartiene (R per resistore, C per condensatore, ecc.) e numero ci dice quale elemento della classe stiamo considerando. In realtà non ci sono vincoli stringenti per definire identificatori. La numerazione può essere progressiva, ma ci possono essere lacune, l'importante è che non ci siano ripetizioni.

Quest'operazione non è proprio il massimo per il progettista, è una fase indispensabile, ma nello stesso tempo attribuire al progettista questa responsabilità di etichettatura è una palla. Questa fase si chiama ANNOTAZIONE e i CAD hanno due modi di eseguire questa fase:

- 1) annotazione assoluta: se la vede tutta il CAD, che gestisce la parte numerica (che dà l'univocità al simbolo), ma non quella letterale della classe. Se degli oggetti hanno già ottenuto un'associazione, il tool la cancella. Questo può dare fastidio, allora per preservare il lavoro del progettista si può avere una notazione incrementale.
- 2) annotazione incrementale: che attribuisce un numero solo a quei componenti che ancora non ce l'hanno. Quest'annotazione può avere influenza anche sui componenti multiparte poiché attribuisce anche la parte. In presenza di descrizione gerarchica, l'annotatore deve identificare correttamente le diverse istanze di un sottosistema e se il sottosistema è usato più volte, deve attribuire identificatori diversi alle singole istanze.

Alcuni CAD professionali hanno delle features che preservano le informazioni MODULO e COMPONENTE ALL'INTERNO DEL MODULO. Questa caratteristica è utile (Debug e Riparazione) per chi gestisce la scheda e per riconoscere componenti omologhi all'interno di diversi sottosistemi.

Sempre ragionando sull'annotazione valutiamo quali altri elementi derivano dall'ultimazione di questa fase: possiamo farci elencare dal CAD gli elementi per avere un'idea della consistenza del progetto attraverso un REPORT.

Si possono avere dei report per avere il conto del materiale (BOM → Bill of Materials). Per fare il BOM occorreranno delle info di reperibilità e costo di ogni componente. Ad esempio poi ogni componente lo possiamo localizzare nello schema, attraverso un report che ci dà le coordinate.

Oltre la BOM sarà fondamentale una lista sulle dimensioni per avere info sul supporto fisico da scegliere.

A questo punto il compito del progettista elettrico è quasi finito. Prima di passare alle fasi successive viene eseguita la ERC. Anche con progetti semplici, tranquilli che verranno fuori una lunga serie di errori. In questo caso si legge la lista di errori a cui è associato un marker (per ogni errore) e si ispeziona il problema per risolverlo.

È importante che l'ERC ci dia OK. Perché?

Il suggerimento è di avere 0 warning e 0 error. Questo perché non abbiamo seconde chance e non potremo correggere le cose dopo. E poi c'è un altro motivo: non è detto che l'elenco presentato contenga tutti e soli gli errori previsti, soprattutto se gli errori sono molti. Ci potrebbero essere errori che ne mascherano altri, ad esempio il cortocircuito di due uscite può essere prevalente su altre info associate a quelle uscite.

Adesso vediamo i passaggi aggiuntivi ausiliari. La descrizione che può essere stampata con report non è adatta né alla simulazione né alla costruzione, serve solo a descrivere. Per passare alle fasi successive le info contenute nel disegno devono essere estratte e fornite ai programmi che ne fanno uso in forma testuale, che si chiama NETLIST. Questa viene estratta dallo schema e deve contenere tutte le info dello schema adatte ai passi successivi. Tipicamente si perde la forma grafica che si aveva e si mantiene solo l'essenziale: insieme di componenti e connessioni. Eventualmente può contenere ulteriori info estratte dal database di progetto. Queste info sono state inserite tramite appositi campi che il CAD prevede. Normalmente i formati di passaggio da un programma all'altro è un "tallone d'Achille", perché c'è uno scambio d'info tra due ambienti con paradigmi diversi. Attenzione che non è detto che anche nello stesso CAD sia garantita l'interoperabilità, ciò è dovuto a una leva commerciale e per ridurre queste problematiche ci sono gli enti di standardizzazione che hanno standardizzato le stesure delle netlist fra i diversi ambienti. Quando si parla di netlist è anche importante saperlo leggere uno schema stilato a righe di codice, non per crearlo da zero, ma per effettuare un controllo di corrispondenza tra schema elettrico e testo, per riscontrare eventuali bug.

Questa riflessione ci porta a dire che ci sono 2 modi di scrivere la netlist:

1) basato su componente → pspice. C'è un elenco dei simboli con i pin e per ogni pin c'è un identificatore di nodo e a nodo uguale corrisponde la connessione. Quindi si specifica interamente la rete.

2) basato su nodo → è complementare al primo metodo. C'è un elenco dei nodi e si dice cosa è connesso a un determinato nodo.

Le due strategie sono equivalenti. La seconda è più utile nel progetto costruttivo, poiché al nodo corrisponderà l'area di conduttore dedicata ai collegamenti. KiCAD contiene tutte e due le sezioni.

Questa vista è la topologia del circuito, poi ci sono info aggiuntive come ad esempio in pspice le model e dei parametri numerici che danno sostanza alla model. Ad esempio la model del MOSFET contiene le info di tecnologia (come il k per la Ids). Poi vengono definiti gli stimoli, le richieste delle sonde, e altro.

Ragioniamo sulla netlist per la costruzione: questa dovrà avere info sulle caratteristiche fisiche del componente. Ci sono 2 cose fondamentali che devono essere aggiunte prima di potere disegnare il progetto geometrico:

1) ingombro sul supporto: il contorno al componente sulla scheda, l'area che occupa.

2) footprint (impronta): insieme delle sagomature delle piste per potere installare il componente.

Queste info devono essere associate a ogni componente e lo si può fare con un ASSOCIATORE che propone per ogni componente cosa associare.

Poi c'è un'altra cosa che si può realizzare:

3) modello 3D del componente: per avere idea della scheda e di tutta la struttura che andremo a costruire. Poi la corrispondenza tra elementi del footprint e pin va esplicitata con chiarezza. Con questo si anticipa che la varietà dei componenti è molto più ampia della varietà del footprint. Più componenti hanno la stessa struttura.

OSS. In realtà ci sono dei gradi di libertà su questa corrispondenza. Ad esempio se scambiamo i contatti di un resistore, questo funziona lo stesso, quindi nello schema i due pin possono essere scambiati tra di loro. È possibile modificare i pin mantenendo inalterata la funzione dello schema anche per altri dispositivi.

Questo grado di libertà si può usare per facilitare il progetto geometrico. Ma perché ora ci poniamo questo problema? Noi ora abbiamo lo schema elettrico "ingessato" e si conoscono già quali saranno le piste da collegare. Quando si va a sbrogliare la scheda ci possono essere dei problemi (non è sempre banale), ma il CAD ci aiuta. Se durante la fase di sbroglio ci accorgiamo che, modificando qualcosa, potremmo avere dei miglioramenti, dovremo modificare il progetto elettrico e ripetere tutte le fasi di progetto viste dall'inizio. Per ovviare al problema, il CAD ci dà una mano: abbiamo un grado di libertà, che si può utilizzare direttamente a livello di progetto geometrico e usare il tool di **back annotation** per riportare le modifiche fatte sul progetto geometrico sullo schema elettrico. Questi tool sono pericolosi, nel senso che bisogna avere ben chiaro poi cosa viene riportato sullo schema elettrico. Uno degli errori più comuni è fare back annotation su un geometrico parziale. Se faccio back annotation a metà progetto geometrico, il tool cancella metà progetto elettrico, perciò è bene fare sempre un backup dello schema elettrico.

Riflettiamo su quali sono le situazioni per cui ritornare sullo schema elettrico potrebbe essere utile:

- 1) ci sono dei componenti passivi elettricamente simmetrici, ma geometricamente non simmetrici. In questi casi potrebbe essere utile ripartire dallo schema elettrico e invertire il componente non simmetrico.
- 2) Un altro caso eclatante per cui vale la pena ripartire da capo è quello dei componenti multi parte: se abbiamo che alcune piste si incrociano e basterebbe scambiare l'orientazione dell'integrato ci conviene ripartire dallo schema elettrico e scambiare di ruolo le uscite che si incrociano.
- 3) La stessa situazione si può avere in un contesto di memorie, dove potremmo dover intrecciare BUS da n-fili.
- 4) Nel caso di dispositivi programmabili potremmo dire al firmware-ista di modificare uscite e ingressi in modo da eliminare l'intreccio, oppure riposizionare l'oggetto sullo schema elettrico.

SELEZIONE COMPONENTI

Qui facciamo riflessioni generali quindi ci poniamo il problema per cui dato uno schema qualunque occorre trovare cosa ci serve. Prima di tutto dobbiamo capire quali sono i componenti che ci serviranno. Abbiamo una grossa divisione tra diverse categorie:

- 1) il componente con alcune proprietà
- 2) a seconda del costo
- 3) a seconda della funzione

Poi a parità di sigla avremo varie opzioni di contenitore o package. La scelta del package è influenzata dalla tecnologia di montaggio che sceglieremo e a questo proposito esistono 2 possibilità:

- 1) quasi totalità delle scelte → montaggio superficiale
- 2) residuo storico → il package è un contenitore con dei piedini che si inseriscono in fori passanti.

Un altro aspetto che ha impatto sulla scelta del package è legato alla facilità con cui il componente poi verrà fissato. Si potrebbe avere la saldatura manuale o a onda. Per entrambi i tipi di collegamento occorre avere dei contatti a vista. Questa cosa non è banale, poiché un processore ha 800 o 900 pin e quindi molti sono sotto la superficie e non li vediamo. Per fare queste saldature si usa una saldatura a riflusso → c'è una pasta che fonde e crea la connessione.

Sulla destra vediamo un elenco delle grosse categorie merceologiche in cui posso classificare il materiale elettronico →

Tipologie di componenti

- **Componenti passivi**
 - **Elementi circuitali lineari**
 - Resistori, potenziometri
 - Condensatori
 - Induttori, trasformatori
 - **Elementi di interfaccia**
 - Connettori
 - Interruttori, pulsanti, relè
 - Lampade, beeper
- **Componenti attivi discreti**
 - **Diodi, ponti**
 - Da segnale, per raddrizzamento, Zener
 - **Transistori**
 - BJT, JFET, MOSFET
 - **Tiristori**
- **Componenti optoelettronici**
 - LED, display
 - Fotosensori
- **Componenti integrati analogici**
 - **Circuiti per l'elaborazione analogica**
 - Amplificatori operazionali, comparatori
 - Amplificatori da strumentazione, di isolamento
 - Blocchi di elaborazione non lineare
 - **Circuiti per la gestione delle alimentazioni**
 - Regolatori
 - Convertitori DC-DC, AC-DC
 - **Funzioni speciali**
 - Timing, RF, ecc.
- **Componenti integrati digitali**
 - **Circuiti logici elementari**
 - Famiglie e sottofamiglie logiche
 - Memorie
 - **Circuiti logici programmabili**
 - PAL, PLD, FPGA, SoPC
 - **Circuiti a controllo di programma**
 - Microprocessori, microcontrollori, DSP
- **Componenti integrati misti**
 - **Convertitori**
 - ADC, DAC

A seconda dello schema che abbiamo in mente abbiamo un'ampia gamma di componentistica analogica tra cui deve avvenire la selezione. Operazionali e comparatori appartengono alla stessa famiglia e la selezione tra questi oggetti adesso è molto più impegnativa rispetto a prima, dove si sceglieva tra 100 oggetti e non 5000. La parte di selezione dei componenti non va sottovalutata a per realizzare un buon progetto: fare i circuiti che funzionano non è difficile, ma se valutiamo il nostro compito in una realtà dove è fondamentale fare una cosa migliore di un'altra, allora il lavoro diventa più impegnativo.

I regolatori e comparatori spesso fanno parte del front-end (interfaccia) tra ingresso e uscita. Sempre nell'ambito analogico si ha un mondo di componentistica relativa all'alimentazione, sia che arrivi dalla rete, che sia interna al circuito. Esistono poi altre categorie nel mondo analogico, che vengono raccolte nel capitolo *special functions* poiché non riescono a fare categoria a sé. Un esempio sono le funzionalità a radiofrequenza: la maggior parte degli ingegneri usa il modulo a RF già assemblato che è già una radio completa e si trova nella sezione RF di un rivenditore.

Spostandosi nel mondo digitale, la selezione dei componenti ugualmente si è espansa in modo straordinario nel corso degli anni. Quella che era la soluzione tradizionale, la famiglia logica, si è estesa nel corso del tempo ed è attuale per ciò che viene definito *logica al contorno* che è la logica che è al contorno di grandi sistemi (Ad esempio digitali). Perciò ancora oggi i cataloghi hanno una grande selezione di funzionalità logiche standard divise per famiglie e in questa categoria si troveranno anche le memorie.

In tempi più recenti si è sviluppata molto l'idea che il sistema logico digitale potesse essere gestito a proprio piacimento anche dopo la vendita all'utente finale. La tendenza è quella di fare chip pieni di dispositivi e poi è l'utente che seleziona le connessioni tra gli elementi logici di un chip a suo piacere. Quindi quando si parla di circuiti logici programmabili, si parla di circuiti dove all'interno ci sono delle funzionalità logici, la cui connettività è programmabile dall'utente. Ce ne sono di varie categorie (PLD, PLA, ecc).

La seconda strada intrapresa per sfruttare la marea di dispositivi che si possono mettere su un chip è stata quella di inventare delle architetture generiche, dove la sua funzionalità sia impostabile tramite il contenuto di una memoria. È la struttura classica di un microcontrollore.

ATTENZIONE: a volte si fa confusione tra gli oggetti. Per il PLA ecc. abbiamo una connettività programmabile, cioè programmo le connessioni; per i micro ho una programmabilità vera e propria, dove l'hardware è fisso e la funzionalità la decido tramite il contenuto di una memoria.

Quindi identificare i componenti vuol dire avere una conoscenza chiara di questi capitoli fino ad entrare in fondo e trovare il nome del componente che ci serve. Ovviamente più cose conosciamo e migliore può venire il risultato. Fra i componenti analogici e digitali, c'è un mixed-world. Infatti prima si faceva tutto in analogico, poi tutto in digitale e adesso si tende a rivalutare la possibilità di integrare dei sistemi analogici all'interno dei chip.

Questo si fa perché la maggior parte delle informazioni all'interfaccia sono analogiche: ad esempio la voce di chi parla giunge alle nostre orecchie tramite onde sonore e prima di poterla pensare come sequenza di numeri, va gestita come segnale elettrico analogo alle onde sonore del segnale. Quindi su uno stesso sistema abbiamo front-end analogico e sezione digitale, interfacciati tramite convertitori.

Prima di passare al capitolo seguente, occorre citare l'idea, che sta avendo grande sviluppo, dove si può integrare non solo il front-end analogico, ma anche il sensore stesso. Ad esempio prima un microfono era fisicamente esterno al chip e tramite il front-end si interfacciava con la sezione digitale del sistema. Con l'avvento dei MemS, il sistema microelettro-meccanico è stato integrato nel chip e quindi è diventato per noi un componente.

Quindi questa grande varietà e disponibilità di oggetti ci pone di fronte a delle scelte in fase di progettazione.

METODOLOGIA DI SCELTA

Limitandosi anche solo ai componenti che si comprano vogliamo darci un metodo per arrivare a scegliere, altrimenti si rimane disorientati davanti a migliaia di possibilità che ci si presentano davanti.

Questo metodo è giusto una linea guida dominata da una razionalità interiore, ma ha una quota soggettiva dovuta alle esperienze personali (Ad esempio perché si studia l'8515 della Atmel? Boh). L'importante è

evidenziare questa componente soggettiva e saperla tenere sotto controllo, poiché su questa componente poi le aziende fanno leva commerciale.

Detto questo, il consiglio è quello di non essere troppo legati, nella scelta dei componenti, a un specifico produttore o dispositivo, ma di essere sempre aperti a nuove scoperte.

Quindi abbiamo un componente generico, come arriviamo a individuare la sigla di quest'oggetto generico? Prima di tutto individuiamo i parametri funzionali: normalmente quando si disegna uno schema, la definizione funzionale è di larga massima (resistere, condensatore, operativo, ecc.).

Poi il nostro oggetto avrà dei parametri funzionali identificativi. Normalmente nella progettazione un oggetto a SC ha un'influenza, come parametro funzionale, minore rispetto ad altri dispositivi, poiché ad esempio l'f_{hfe} è un parametro intrinseco alla tecnologia.

Sempre dallo schema poi, un certo numero di parametri, mi costituiranno i vincoli a cui deve essere soggetto un sistema: ad esempio la potenza dissipata da una resistenza, condizioni particolari elettriche, ambientali, dinamiche d'in e out.

Questi vincoli limitano la mia libertà e quindi paradossalmente sono benvenuti, poiché riducono le migliaia di oggetti che potrebbero andare bene per il sistema che sto realizzando. Spesso i vincoli non riguardano il funzionamento base di prima analisi, ma possono riguardare anche caratteristiche di durabilità che non sono poi così chiare in prima istanza.

OSS. Se un oggetto non è influente e non è critico, cercherò di accettarlo anche in forme di qualità non eccelse, privilegiando il parametro COSTO.

Quindi col primo punto ci si fa un'idea di cosa scegliere e non va sottovalutato: perché poi in base all'applicazione i parametri del dispositivo verranno considerati come vincolo o meno.

A questo punto, il progettista rispetto a questo insieme dei parametri occorre stabilire delle priorità e tra i parametri di qualità rimanenti occorre capire cosa è più importante o meno, fino al punto di arrivare ad un peso o costo di alcuni parametri.

Finalmente si arriva a valutare i requisiti economici che sono:

-costo

-disponibilità e reperibilità

Il costo è ciò che paga il costruttore per produrre un certo oggetto e non va confuso con il prezzo, che verrà poi presentato al cliente.

Disponibilità e reperibilità sembrano simili, ma hanno una differenza non molto chiara inizialmente.

La disponibilità mi indica quanti pezzi mi possono rendere disponibili nell'unità di tempo, tutti i produttori di quell'oggetto. Quindi a seconda della quantità che produco (target produttivo) occorre che i produttori soddisfino la mia richiesta in termini di quantità e si parla di numeri significativi. Inoltre questa disponibilità deve essere mantenuta nel tempo per assicurare la continuità della mia produzione. Se questa disponibilità non c'è, ad un certo punto saremo insolventi rispetto al committente e poi ci saranno dei ritardi, che si ripercuoteranno in termini di immagine dell'azienda per cui lavoriamo.

La reperibilità invece è differente: immaginiamo che la disponibilità ci sia, ma che il produttore sia unico.

Dopo aver concordato la prima commessa, se il produttore unico raddoppia il costo dell'oggetto per chissà quale motivo, noi dobbiamo accettare senza diritto di replica e il nostro business plan inizia a lievitare poiché entrano in gioco costi imprevisti.

L'unica alternativa sarebbe la second source, come fa il DOD americano: in pratica occorre che un produttore dia la licenza di costruzione ad un'altra ditta in modo da tutelarsi da problemi di irreperibilità da parte del committente. Inoltre è anche un meccanismo di sicurezza interno, per evitare problemi logistici e di sicurezza.

OSS: a volte è difficile avere una second source su oggetti complessi (tipo micro). Ciò è dovuto ai costi di layout e tutta una serie di apparati di contorno che caratterizzano la produzione di questi sistemi. Allora per questo alcune aziende, come la PowerOne, fanno due progetti dello stesso sistema con componenti di produttori diversi. Questo serve proprio perché se un produttore alza il prezzo, oppure modifica delle

caratteristiche del contratto stipulato, o ci sono dei problemi naturali (come disastri sismici, incendi ecc) allora l'azienda committente può cambiare produttore e di conseguenza componente senza essere vincolato totalmente a un produttore.

STRUMENTI PER LA SELEZIONE

Quali sono questi strumenti? La prima scelta prevede una conoscenza abbastanza accurata di ciò che vogliamo. Questo poiché la tecnologia con cui è realizzato un oggetto, ne influenza in modo drastico le prestazioni. Infatti è chiaro che io ingegnere, quando inizio a cercare qualcosa, devo sapere prima di tutto se esiste quello che sto cercando e poi in quale categoria di oggetti dei produttori andare a cercarlo. Quindi il primo ramo di scelta me lo dà la mia conoscenza dei componenti, **che va tenuta sempre viva!!! (ad esempio iscrivendoci alle newsletter dei produttori)**

La più grande fonte di informazioni sull'elettronica, accurata, sono i produttori: questi ci forniscono data sheet, application note, strumenti aggiuntivi di selezione quali cataloghi ragionati, tabelle di selezione parametriche. Tutti questi strumenti sono fondamentali. Inoltre a volte i produttori ci forniscono dei *reference design*, cioè dei progetti completi e funzionanti che usano i componenti del produttore che ha fornito questo esempio.

Osservate che il fatto che sia così facile reperire informazioni per noi elettronici, non è così banale in altri settori, come quello meccanico ad esempio. Nel mondo meccanico hanno un ruolo fondamentale altre figure, che nel mondo elettronico sono più sfumate, quali il distributore, l'agenzia di territorio ovvero dei canali più fisici. Un'ipotesi di questa situazione potrebbe essere che il mondo in cui si sono sviluppati i dispositivi elettronici è un mondo dinamico, avanzato dove è stato naturale utilizzare lo strumento telematico per rendere disponibile la documentazione.

Abbiamo visto come nel mondo elettronico i produttori sono le maggiori fonte d'informazione per gli utenti finali. C'è però un grosso problema: ciascun produttore vende le proprie cose, quindi vuol dire che, quando andiamo sul sito di un produttore, già abbiamo scelto di acquisire l'oggetto da quel produttore specifico. Normalmente uno stesso oggetto può essere prodotto anche da 30 produttori. Se un oggetto ha solo 2 produttori è facile scegliere, ma altrimenti no. Anche perché a volte cambiano di poco le versioni di uno stesso oggetto di più produttori, quindi ci può essere qualche imbarazzo nella scelta, specialmente nel mondo analogico.

Normalmente una grande azienda di semiconduttori ha la parte di design e la fonderia. Oggi fare produzione microelettronica ha costi stratosferici, quindi c'è stata la divisione di questi due settori: alcuni fanno il design (fab-less) e poi si rivolgono, per la fabbricazione, a grosse aziende cinesi che forniscono tecnologie microelettroniche. Anche in Italia ci sono diverse fab-less che in pratica sono design center. Per sfuggire a questo collo di bottiglia, ci si rivolge non a chi produce componenti elettronici, ma a chi li distribuisce.

Tradizionalmente il distributore è una persona, un ufficio ramificato sul territorio, dove l'agente di zona ha un riferimento. Il distributore si accaparra contratti con grandi aziende e si assicura di essere l'unico a potere distribuire quella componentistica. Questo canale tradizionale 25 anni fa circa è stato sconvolto dai distributori indipendenti on-line. La grande distribuzione ha acquisito un peso enorme: nel mondo dell'elettronica questi distributori vendono più o meno tutto, non è evidente un legame con qualche produttore in particolare e hanno un mercato su scala mondiale.

Da progettisti, ci chiediamo come la presenza di questi canali ci aiuta nel processo di selezione: osserviamo nella storia come questi distributori si sono affermati e vediamo quali sono i punti di forza, per cui non hanno presentato crisi. Nel caso della progettazione elettronica abbiamo un processo consolidato, che deriva dal fatto che questi distributori hanno un catalogo illimitato di componentistica, perciò sono in grado di rendere disponibili anche componenti rari. Le cose che pensiamo di usare noi hanno un tempo di vita di 2 anni, dopo 2 anni ne esce uno migliore e quindi se si ha roba in magazzino rappresenta un costo mostruoso per il distributore. La forza della distribuzione on-line è che permette di accedere all'ultima novità: diventa una vetrina. Un grosso negozio di elettronica è difficile che abbia l'ultima novità poiché i canali per le news

sono canali a diffusione ampia e beta test. Un'ulteriore vantaggio è dettato dalla logistica avanzata assecondata da 2 cose:

- internet (prima occorre chiamare per ricevere il catalogo valido ogni 6 mesi).
- tracking delle spedizioni in tempo reale e preciso!

Questo è il canale dominante per le aziende in fase di prototipazione, anche perché la distribuzione classica tende a privilegiare il grande cliente.

Vantaggio: essendo svincolato dalla produzione abbiamo degli strumenti di selezione più oggettivi. È un punto di forza, ma è anche critico per i distributori on-line.

Con questo canale si trova velocemente una documentazione tecnica on-line: data sheet, application note ecc. Gli strumenti classici per la ricerca sono i motori di ricerca con varie tipologie di ricerche.

Più utile nel momento in cui abbiamo chiaro cosa cercare, sono le **tabelle di selezione parametrica**: sono delle tabelle dove in ogni colonna viene indicato un parametro dell'oggetto e nelle righe i singoli modelli del componente. Una tabella così è sterminata, e una cosa che si può fare è l'attivazione di filtri (1) e l'indicizzazione (2):

1→ il software ci fa selezionare una caratteristica specifica per ogni parametro che seleziono (es. $V_{cc} < 5V$)

2→ l'indicizzazione permette di mettere in ordine in funzione di un parametro. Molto utile per il parametro costo.

Quindi questo sarà lo strumento che metteremo in pratica per la scelta dei componenti nei nostri progetti. Questa serie di vantaggi hanno un costo: pensate che per la prototipazione la velocità di consegna non ha prezzo.

OSS. Alcuni distributori hanno delle fasce di prezzo in funzione del numero di oggetti che acquistiamo.

La distribuzione tradizionale continua a sopravvivere, poiché il distributore conosce di persona il grande produttore e riesce ad ottenere sempre prezzi vantaggiosi su grandi quantità, in particolare più vantaggiosi rispetto a quelli dei distributori on-line.

I siti dei principali distributori

- Con sede in Europa
 - www.rs-components.com
 - www.farnell.com
 - www.distrelec.com
- Con sede fuori
 - www.digikey.com

La differenza tra sede europea o non, sta nel costo della dogana. Questo problema però tende ad essere risolto con sedi in Europa da parte di distributori esterni.

Come si organizzano distributori e produttori?

Prima uno va dal distributore e poi se l'oggetto da scegliere è sofisticato, viene indirizzato stesso dal distributore sui vari produttori e li troveremo info più dettagliate per potere fare la scelta finale.

SELEZIONE COMPONENTI PASSIVI

→ RESISTORE

È un bipolo passivo tipicamente simmetrico, presenta proporzionalità tra V e I. Per il resistore ideale, a prescindere dall'intensità del carico, la relazione tra tensione e corrente non varia (ma così non è in realtà). La R (ideale) è costante nel tempo e quando disegniamo un resistore nel circuito dovremo associare a questo i suoi effetti capacitivi e di rumore.

Quali sono i parametri di scelta di un resistore?

Il suo valore nominale in ohm, a volte nell'identificazione c'è anche la specifica della tolleranza, che ci dà un'informazione sul discostamento del valore reale da quello nominale del resistore.

Poi avremo dei **parametri di vincolo**: cioè parametri indispensabili da ottenere

→ potenza dissipata (quanti watt accettiamo di smaltire)

→ resistenza termica

→ tensione operativa

→ stabilità all'impulso: la potenza dissipata è una potenza media su un intervallo di tempo molto maggiore della costante RC costituita da R termica e C termica del condensatore. Mentre se ho delle potenze istantanee elevate come posso accettare questi picchi di potenza elevati? Il mio resistore va bene o no? Il problema è che dipende da com'è fatto l'impulso, quanto dura, gli aspetti fisici di connessione e la capacità di dissipare calore da parte del resistore.

Poi ci sono dei **parametri di qualità** :

→ stabilità: capacità di mantenere nel tempo il valore nominale

→ coefficiente di temperatura: come varia la $R(T)$, più è basso e migliore è il resistore

→ non linearità: minore è e migliore è il resistore

→ rumore: non ci si può fare nulla, però tenere presente che oltre al rumore termico ci sono dei rumori dovuti a come è collegato il resistore (ad esempio rumore di contatto, rumore dovuto al passaggio tra zone cristalline di un policristallo).

→ caratteristiche ad alte frequenze: è un parametro di qualità sulle grandezze parassite

Partiamo dai **valori nominali**: questi li ricaviamo risolvendo la rete analiticamente. Tipicamente le R si scelgono dall'ordine compreso tra i milli-ohm e i giga-ohm, ma attenzione che gli estremi di questo delta sono problematici, poiché questi valori sono confrontabili o con le R di contatto oppure con le R di dispersione della rete.

Il secondo problema (dopo quello del range da utilizzare) è dato dal fatto che c'è una serie di numeri discreti delle R. Nella produzione industriale esistono dei valori numerici preferiti costruiti in serie finite, che normalmente vengono prodotti e devono essere usati per coprire tutte le esigenze di tipo pratico.

Perché?

Quando la produzione era artigianale il problema non si poneva: ogni artigiano realizzava la richiesta del singolo utente. Quando si è iniziato a fare le cose a livello industriale sono iniziati i problemi: se il produttore è unico non c'è il problema poiché mi faccio tutto io, come le grandi corporate cinesi. Queste corporate costruiscono in proprio dal chiodino più piccolo al grande caterpillar, hanno un approccio verticale che nel corso del tempo ha mostrato i suoi limiti ed è stato sostituito dal concetto di standardizzazione. L'idea è quella per cui se realizzo oggetti interoperabili posso avere chi produce e chi utilizza l'oggetto prodotto. Questo però fa sì che non possiamo pensare che il produttore produca infiniti modelli di un oggetto per le infinite esigenze degli utilizzatori, poiché farsi fare qualcosa su misura farebbe esplodere i costi. Quindi il concetto di **numero preferito** è legato al concetto di **standardizzazione** e alla **qualità del processo produttivo** → tolleranza con cui riesco a realizzare un certo parametro di progetto. La tolleranza è specificata in modo relativo, quindi il parametro di solito viene garantito nell'intorno di una

certa percentuale del valore nominale. Questa caratteristica è legata alle capacità che esistono di misurare facilmente quel parametro.

Ci sono 2 modi per fare cose di valore accurato:

1) avere un processo produttivo perfetto che garantisce di avere un risultato preciso al millimetro

2) posso produrre in modo meno accurato e poi le cose che faccio le misuro e le classifico in post produzione: e poi in funzione della mia capacità di misura faccio una classificazione.

Inoltre per i resistori, visto che la resistività dipende da L e S (lunghezza e sezione), posso inventare un dispositivo che in post-produzione, mi permette di aggiustare l'oggetto realizzato nel caso in cui non rispetti determinate specifiche. Quest'operazione si chiama **trimming**, messa a punto.

Quindi ad esempio potrei fare i resistori sempre un po' più piccoli di quello che dovrei (quindi più grandi fisicamente) e poi li assottiglio con un laser in fase di trimming per perfezionare il valore della R.

Non è banale quest'operazione perché il laser quando taglia e riduce la sezione, scalda anche, quindi potrei alterare la misura successiva della resistenza.

Sicuramente tra serie di valori preferiti e tolleranza c'è una relazione: queste serie hanno un tot di valori per decade (si pone la media geometrica tra un valore e il successivo, poiché se la tolleranza è percentuale, il concetto base con cui si costruiscono le serie è che, prima di tutto il range di valori che copre un resistore con la sua tolleranza crei un intervallo. Es: con tolleranza del 30%, il resistore da 1 ohm copre un intervallo di valori da 0,7 a 1,3 ohm.

L'idea è di far sì che le resistenze nominali con le tolleranze siano distribuite senza sovrapposizioni tra gli intervalli, ma quasi con continuità.

Vediamo quali sono le serie preferite per i resistori: le serie più diffuse sono quelle con 6,12,24,48,96,192 valori per decade.

La regola con cui si trovano i valori è la seguente:

$$R_{d,n}(EN) = 10^{(d+n/N)}$$

La ragione è circa il doppio della tolleranza, ciò è dovuto al fatto che non vogliamo troppa sovrapposizione.

Se si fanno i conti esatti, i valori reali che troviamo a catalogo non sono proprio quelli che vengono fuori dalla serie matematica: poiché le cose matematiche si intrecciano con la storia, le cose umane e gli enti normativi. Infondo già aver scelto delle serie decadiche è arbitrario dal punto di vista matematico. Il vecchio modo di identificazione del componente è un aspetto importante sia per montarlo che per analizzare la scheda. Le vecchie resistenze through hole avevano usato il codice a colori per identificare il valore nominale. Normalmente i resistori presentano un numero variabile di strisce a seconda del numero di cifre significative che devono essere espresse: 2 righe per la mantissa e 1 per il moltiplicatore. Per le serie all'1% di tolleranza si hanno 3 righe per la mantissa. Nella pratica professionale è difficile che useremo questi resistori, useremo gli **SMT** (Surface mount technology → Tecnologia a montaggio superficiale). Hanno una loro codifica molto più compatta, di solito si cerca su internet il resistor marking per vedere il valore di quel resistore.

Il coefficiente di temperatura tipicamente viene specificato attraverso lo scostamento al primo ordine, così viene calcolato sui data sheet.

$$\alpha = \frac{R_{\theta} - R_{20}}{R_{20}(\theta - 20)}$$

con

$$\frac{\Delta R}{R_{20}} = \alpha \Delta \theta$$

teta rappresenta il range di temperatura permesso per un resistore: varia dalla Tmin alla Tmax permesse. Di solito questi valori sono misurati in ppm.
 alfa per il Dteta (prevista per l'applicazione) ci darà la variazione di R in funzione della T.

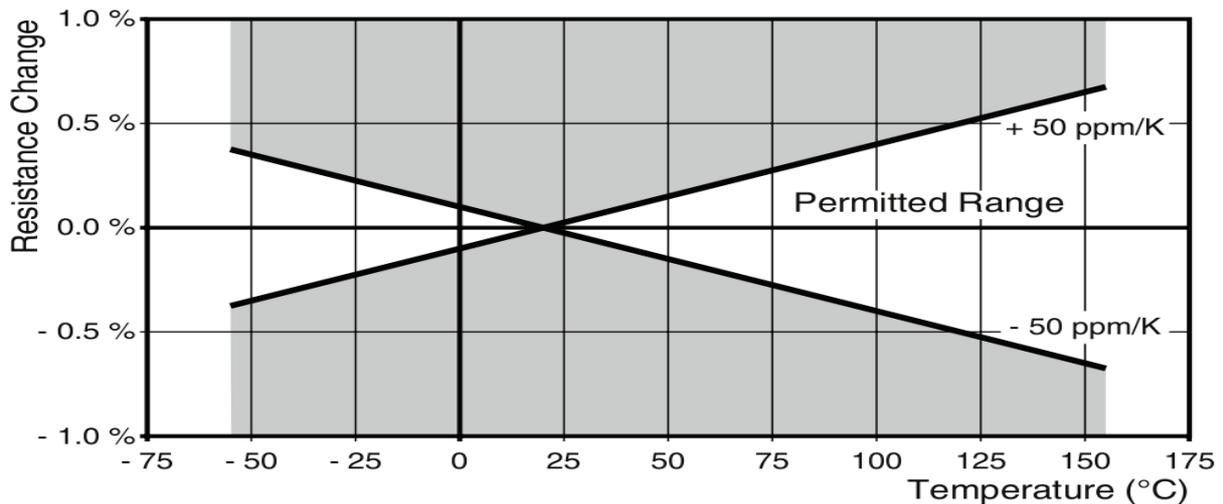


Fig. 8 - Example of possible relative changes in the resistance value due to the TCR

Maggiore è lo scostamento dal valore nominale e maggiore è il range di incertezza in cui il resistore opera.

POTENZA MEDIA DISSIPABILE: attenzione al dimensionamento nel progetto.

Con i through hole era difficile avere problemi poiché dissipavano tranquillamente ¼ di Watt o 1/8; ora che i resistori sono a montaggio superficiale e sono piccoli, bisogna fare attenzione alle correnti che ci sono in gioco e la massima potenza che potrebbe dissipare. Ovviamente la potenza media dissipabile in continua dipende dalla grandezza del resistore, dalla forma e dai materiali circostanti, ma **principalmente** dalla superficie con cui il resistore scambia calore con l'esterno e la conducibilità termica di ciò che gli sta attorno. Questi parametri sono legati dalla legge di Fourier e se la T dell'ambiente circostante aumenta, anche se il resistore può resistere fino a 200° (ad esempio) il delta di Temperatura ammissibile si riduce e potremmo essere costretti a ridurre la potenza massima dissipata: si chiama **derating il meccanismo attraverso il quale, all'aumentare della T esterna, il valore nominale di potenza deve essere ridotto.**

La legge di joule ci dice che $RP=V^2$.

Questi valori sono i primi valori che si trovano su un catalogo.

La **robustezza all'impulso** è un concetto più delicato: se siamo in applicazioni con picchi di potenza di durata più o meno lunga a cui è sottoposto il sistema il dimensionamento diventa critico. Ci sono dei parametri che specificano la robustezza del resistore ai picchi di corrente. Di solito il parametro i^2*t (energia a resistenza fissata) più che per i resistori in positivo, viene dato per i fusibili in negativo. OSS. Per avere l'energia si dovrebbe fare l'integrale. Comunque questa relazione (i^2*t) ci dice le conseguenze a seguito di uno spike di energia di quella intensità.

Tipicamente mentre la Potenza media a regime dipende da come smaltisce il calore il resistore verso l'esterno, l'impulso dipende sempre dal comportamento del resistore rispetto all'impulso stesso.

Questa modalità si scontra con un problema dovuto alla durata dell'impulso. La strategia da adottare è una soluzione mista teorico-empirica in cui intervengono gli enti normativi, per cui la robustezza della R all'impulso viene valutata rispetto ad impulsi di durata e forma standardizzata. Un unico impulso non è sufficiente e i più diffusi sono questi 2:

Figure 1a. Combination Wave Open-Circuit Voltage

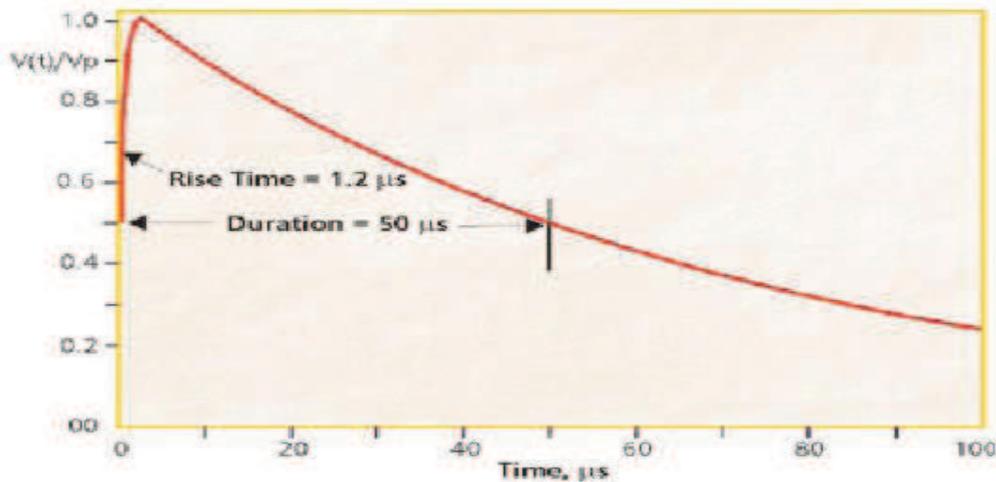
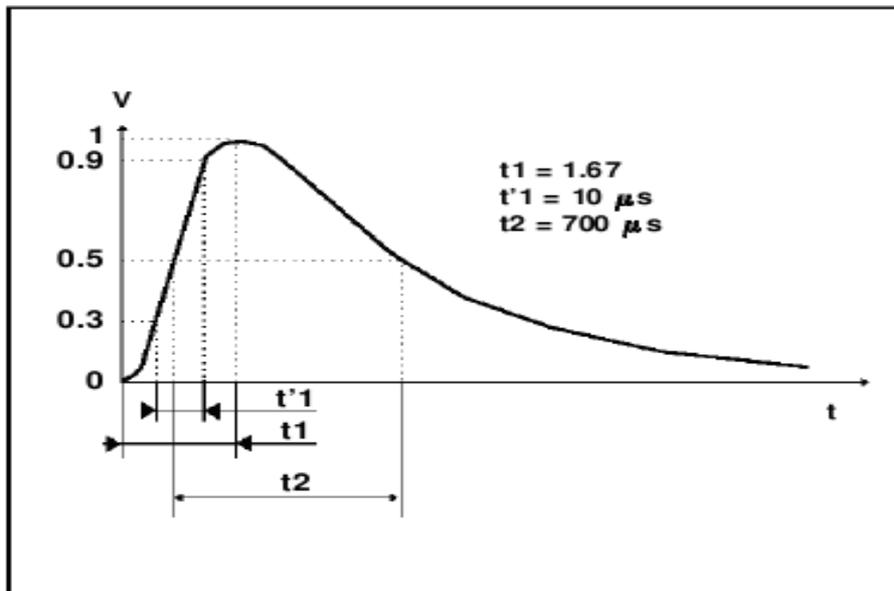


Figure 1 : CCITT 10/700 μ s Surge Definition



ma nulla vieta che per particolari applicazioni ci possano essere altri impulsi. Chi mi vende una R mi dice che la robustezza è stata definita a impulsi con quest'andamento, quindi se rimango entro certi limiti di impulso posso stare tranquillo.

La **stabilità** è un parametro importante se la nostra applicazione deve avere un tempo di vita prolungato: si parla di breve e lungo termine e quindi viene definita rispetto a tempi caratteristici e anche in questo caso ci sono condizioni di test standardizzate. In pratica troviamo scritto il valore del resistore dopo un tot di tempo sotto certe condizioni, rispetto al valore iniziale.

A volte si dà una specifica assoluta o percentuale.

L'affidabilità è definita come la probabilità di un sistema a conseguire un certo tempo di vita, detto tempo di missione, quindi è quantitativamente ben definito. Con questo tipo di specifiche per un progetto è utile avere informazioni sulla stabilità anche dei componenti e in questo caso dei resistori. L'approccio tipico dei produttori è quello di eseguire prove standardizzate o prove inventate da loro stessi: per i resistori si fanno prove alle condizioni limite di funzionamento per caratteristiche termico meccaniche. Il valore alla fine del test (immaginabile come un test di vita accelerata) si può associare a condizioni di vita normali. Questi risultati si possono esprimere sia in termini assoluti, che percentuali. I risultati dei test si vengono espressi attraverso le classi di stabilità:

STABILITY CLASSES	LONG-TERM TESTING	SHORT-TERM TESTING
2	$\pm (2 \% \cdot R + 0.1 \Omega)$	$\pm (0.5 \% \cdot R + 0.05 \Omega)$
1	$\pm (1 \% \cdot R + 0.05 \Omega)$	$\pm (0.25 \% \cdot R + 0.05 \Omega)$
0.50	$\pm (0.50 \% \cdot R + 0.05 \Omega)$	$\pm (0.10 \% \cdot R + 0.01 \Omega)$
0.25	$\pm (0.25 \% \cdot R + 0.05 \Omega)$	$\pm (0.05 \% \cdot R + 0.01 \Omega)$
0.10	$\pm (0.10 \% \cdot R + 0.02 \Omega)$	$\pm (0.05 \% \cdot R + 0.01 \Omega)$
0.05	$\pm (0.05 \% \cdot R + 0.01 \Omega)$	$\pm (0.025 \% \cdot R + 0.01 \Omega)$

Le classi di stabilità vengono associate alla tolleranza del resistore. Ha poco senso, ad esempio, acquistare un resistore di 1ppm se la classe di stabilità non è alta, altrimenti rispetto alle specifiche di progetto il nostro componente potrebbe cambiare il suo valore.

Parlando del **rumore** avremo 3 fonti che lo generano:

- 1)il rumore termico → non ci si può fare nulla
- 2)il rumore di corrente → associato nei resistori di grande valore al passaggio degli elettroni tra aree omogenee ed è tipico dei resistori a impasto
- 3)il rumore di contatto → è presente nelle aree di giunzione tra zone di un policristallo. Questo è inversamente proporzionale all'area della sezione d'attraversamento e perciò ci potrebbe costringere a usare resistori più grandi per applicazioni a basso rumore. Tipicamente in fase di progetto, lo spazio a disposizione è dettato dalle specifiche e quindi la tendenza del progettista sarebbe quella di usare i componenti più piccoli possibili, ma per ridurre questo rumore potremmo dover raggiungere un compromesso.

La **linearità** dei resistori varia con la temperatura, infatti la dipendenza della corrente che scorre nel resistore in funzione della tensione applicata ai suoi capi è mediata dall'autoriscaldamento del resistore.

In fase di selezione e scelta del componente, una delle prime possibilità di selezione che restringe il campo di ricerca è avere chiara l'idea delle diverse tecnologie di realizzazione dei resistori. Perciò diamo un'occhiata, con l'occhio del progettista, a quali sono le tecnologie realizzative maggiormente disponibili.

I **resistori a film** rappresentano il gruppo maggiore: la parte conduttrice è costituita da una pista di metallo depositata su un dielettrico. Nell'ambito dei resistori a film esistono 2 categorie :

-film sottile: si associa una migliore tolleranza e ciò vuol dire anche migliore stabilità. Sono oggetti dove la migliore tolleranza si ottiene con processi di trimming.

-film spesso: sono la maggior parte dei resistori, non si ricorre a trimming e la qualità è dell'ordine del 5% Tra queste due categorie c'è un ordine di grandezza di prezzo: da centesimi a decine di centesimi di euro e la cosa non è trascurabile.

Del vecchio mondo c'è qualche residuo anche oggi, quindi i migliori resistori con una migliore accuratezza del valore in ohm dal punto di vista statico, sono quelli a filo.

Resistori a filo: sono costituiti da un filo di opportuno conduttore (nikel-cromo), si possono trafilare in fili sottilissimi e hanno un'elevata accuratezza, poiché possiamo avere conoscenza accurata dei parametri geometrici.

La tecnologia through hole era la tecnologia migliore, ma sono poco adatti alla realizzazione SMT, rispetto a quelli a film. L'avvento del SMT ha dato un grande colpo a questi resistori through hole, anche perché gli SMT hanno una L parassita molto più bassa rispetto agli altri.

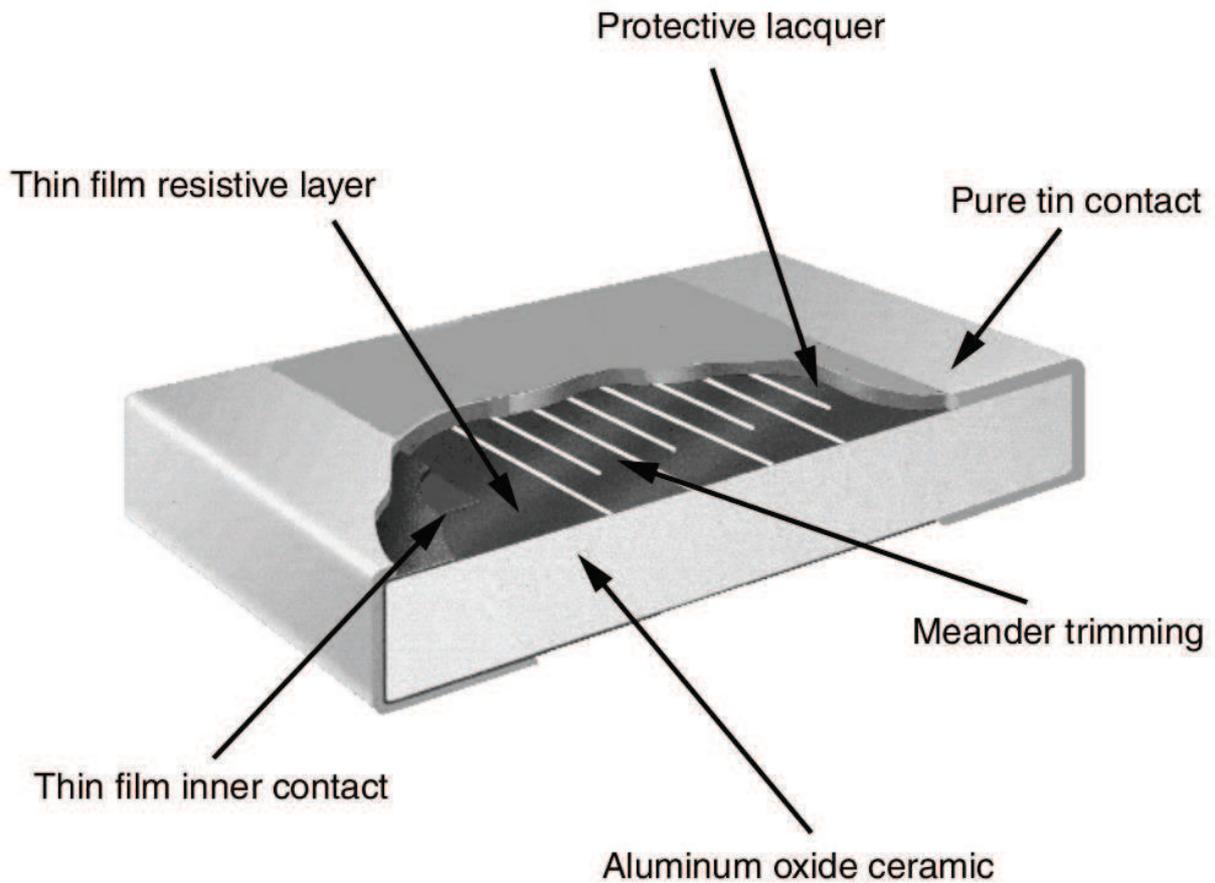
Resistori a impasto: questi usano come base, non un metallo con resistività bassa, ma una lega appositamente progettata. Altrimenti per aumentare la resistenza, si dovrebbero avere resistori con superfici piccolissime o lunghezze estese. Di solito, se si usano semiconduttori, si preferisce il Carbonio come base e non il Silicio. Questa composizione comporta che il coefficiente di temperatura dell'impasto tipicamente è negativo: all'aumentare della T, aumenta il numero di portatori. Sono più rumorosi poiché sono costituiti da un policristallo e ai bordi di grano si hanno delle barriere di potenziale, che causano la presenza del rumore.

La tabella riguarda i resistori della VISHAY DALE e sono elencate le diverse tecnologie, con i diversi valori dei parametri:

RESISTORS	CARBON FILM	METAL FILM	THICK FILM	METAL FOIL	CARBON COMPOSITION	WIREWOUND	POWER METAL STRIP
Resistance Value	10 Ω to 22 M Ω	0.22 Ω to 22 M Ω	1 Ω to 100 M Ω	2 m Ω to 1 M Ω	1 Ω to 20 M Ω	0.1 Ω to 300 k Ω	0.1 m Ω to 1.0 Ω
Tolerance [%]	± 2 to ± 10	± 0.1 to ± 2	± 1 to ± 5	± 0.005 to ± 5	± 5 to ± 20	± 0.1 to ± 10	± 0.5 to ± 1
Temperature Coefficient [ppm/K]	- 200 to - 1500	± 5 to ± 50	± 50 to ± 200	± 2 to ± 50	- 200 to - 1500	± 1 to ± 200	± 30 to ± 250
Maximum Operating Temperature [°C]	+ 155	+ 155	+ 155	+ 150	+ 150	+ 400	+ 275
Rated Dissipation P_{70} [W]	0.25 to 2	0.063 to 1	0.063 to 0.25	0.25 to 10	0.25 to 1	0.25 to 100	0.1 to 5
Stability at P_{70} (1000 h) $\Delta R/R$ [%]	± 0.8 to ± 3	± 0.15 to ± 0.5	± 1 to ± 3	± 0.05	+ 4/- 6 (typical - 3)	± 1 to ± 10	± 1 to ± 2
Operating Voltage U_{max} [V]	200 to 1000	50 to 500	50 to 200	200 to 500	150 to 350	25 to 1000	$\sqrt{P_{70} \times R}$
Current Noise [$\mu V/V$]	< 1	< 0.1	< 10	< 0.025	2 to 6	negligible	negligible
Non-linearity A_3 [dB]	> 100	> 110	> 50	negligible	~ 60	negligible	negligible

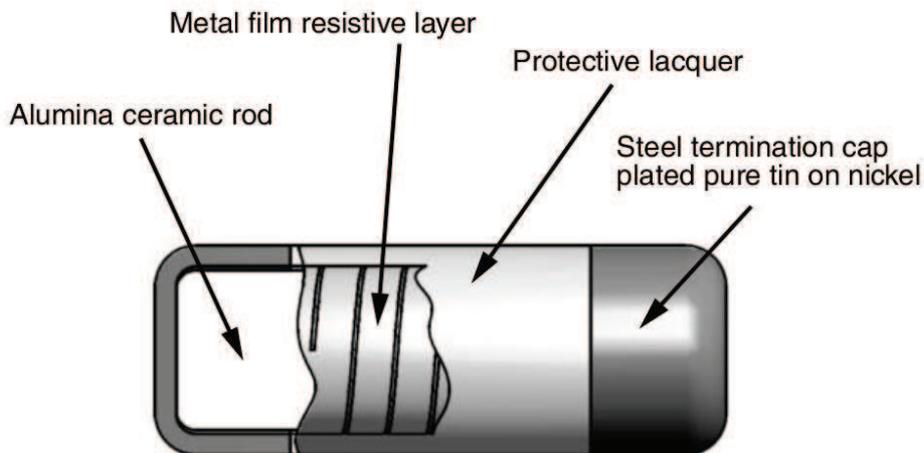
Vediamo adesso un po' di immagini, che ci aiutano a capire le varie tecnologie viste prima.

METAL FILM RESISTOR



Abbiamo un supporto di allumina (in bianco), al di sopra c'è steso il film. I contatti, in questo caso sono di stagno, sono delle U agli estremi e vengono usati anche per connettere l'oggetto sulla scheda dove ci sono le piste. Quest'oggetto viene poggiato sul PCB e poi viene saldato agli estremi con dello stagno. Per realizzare il valore c'è un trimming a meandro, vengono fatti dei tagli sul foglio metallico, in modo da creare un percorso della lunghezza desiderata. Poi c'è la lacca protettiva sopra, dove viene messa la marcatura.

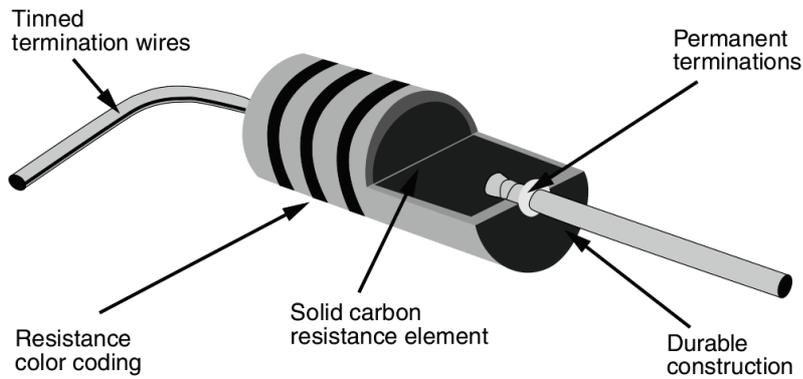
MELF resistor



Per i resistori, questo ha una certa fortuna: questi package mantengono la forma ceramica, anche se poi anche quest'oggetto poi si salda attraverso i due cappucci cilindrici. Sono piccoli cilindretti di qualche millimetro, in questo caso c'è un metal (film di allumina) depositato sui bordi e poi i meandri vengono

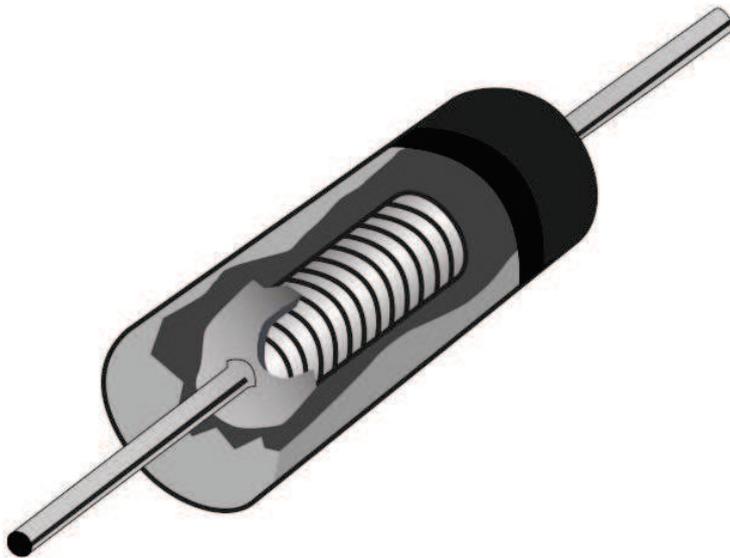
ottenuti facendo un taglio e creando un percorso a spirale sulla base. **MELF** significa **Metal Electrode Leadless Face** ovvero elettrodo metallico senza terminali.

COMPOSITION RESISTOR



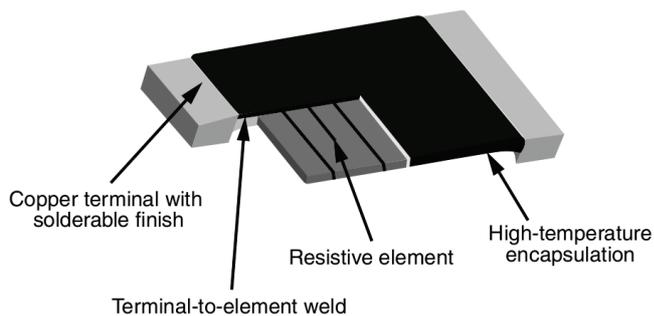
Questo è il vecchio resistore a impasto through hole. Non ci sono particolari osservazioni. C'è il filo stagnato che viene fissato al contenitore di resina, che contiene l'impasto di resina.

WIREWOUND RESISTOR



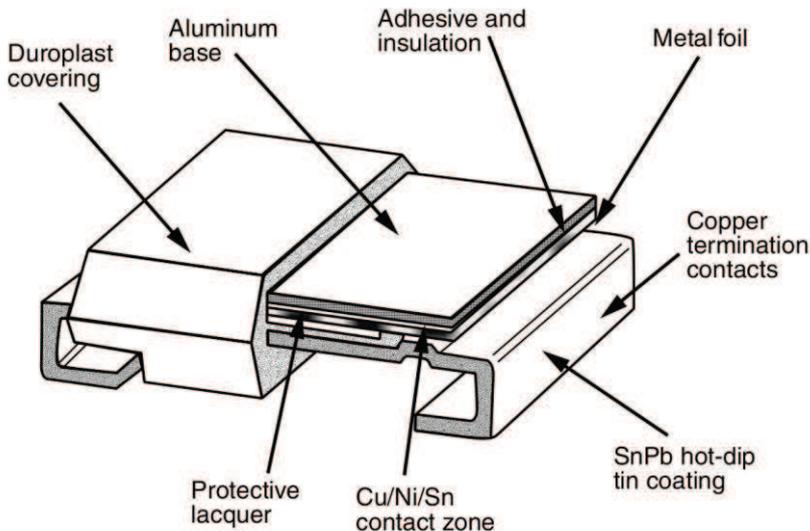
Questo è il classico resistore a filo con contenitore di resina, protettivo isolante, i due cappucci metallici, l'interno è ceramico e all'interno ci sono le spire avvolte in maniera che, con qualche truccetto, si può ridurre l'induttanza parassita.

POWER METAL STRIP RESISTOR



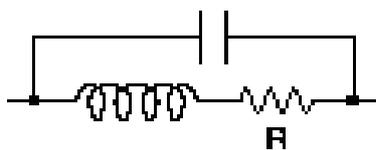
Questo è lo shunt di corrente e in questo caso, quello che si nota è che l'elemento resistivo è molto più massiccio. Ci sono le due terminazioni in rame rivestito in maniera da potere essere saldato attraverso gli estremi. L'elemento resistivo viene sempre sagomato con tagli in modo da avere la R voluta. I terminali sono saldati alla parte resistiva ed il tutto è incapsulato attraverso uno smalto ad alta temperatura.

METAL FOIL RESISTOR

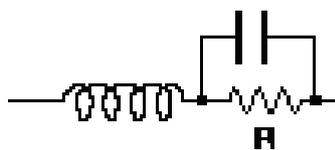


Qui si ha il foglio metallico all'interno del package: è abbastanza diffuso, le due U a destra e sinistra formano il contatto metallico. Sul contatto metallico, c'è il contatto fra foglio metallico di materiale resistivo e un foglio di alluminio che facilita la dissipazione. Il tutto viene annegato nella resina epossidica (volgarmente detta plastica dura).

Andiamo avanti: per gestire e capire se ciò che abbiamo introdotto ha alterato il nostro progetto base, cosa dobbiamo valutare? **Dobbiamo capire quali sono gli elementi parassiti.** Finora abbiamo visto parametri di accuratezza, ma non parassiti. Tipicamente il modello del resistore è così schematizzato:



Circuito equivalente di un resistore reale (a impasto)



Circuito equivalente di un resistore reale (a filo)

Si ha il resistore con la sua L e C parassite. Nel caso del resistore a filo si ha un modello più calzante che è quello che evidenzia l'induttanza serie del sistema, ovviamente se poi vorremo tener conto della capacità tra gli elettrodi esterni, dovremo inserire un'ulteriore capacità. Notate che quello che viene fuori tipicamente è un gruppo LC parallelo, quindi questo vuol dire che se utilizziamo i resistori alle alte frequenze, qualche attenzione in più dovrà esserci. Se si ragiona in termini di RF occorrerà fare attenzione, poiché l'impedenza del gruppo è tutt'altro che R e bisognerà fare attenzione anche alla frequenza di risonanza per cui quell'impedenza tende all'infinito. Di solito dal punto di vista progettuale si va a cercare quel resistore per cui i parametri parassiti e le frequenze in cui la Z cambia dal valore R, sono trascurabili. Anche perché di solito i costruttori ci danno quasi sempre i valori massimi di queste grandezze parassite, quindi non ci possiamo fare affidamento in fase progettuale.

Forma dei resistori

I resistori per montaggio through hole, sono dei cilindri e hanno dei reofori assiali. Vengono identificati con il codice a colori e dissipano potenze da 1 a 1/8 di watt. I resistori di potenza di solito fanno categoria

Per i produttori è sempre un problema rientrare in qualche standard ,poiché devono adeguarsi allo standard ed è un limite per l'intercambiabilità del prodotto.

Per il modello equivalente (resistore con induttanza e capacità) si hanno dei valori pratici che ci mettono in guardia, sull'effetto che può avere il condensatore parassita, soprattutto se la frequenza del sistema aumenta.

Frequency (kHz)	Impedance	
	Magnitude (k Ω)	Phase Angle (degrees)
1	1000	0
9	1000	-3
10	990	-3
50	920	-11
100	860	-16
200	750	-23
300	670	-28
400	610	-32
500	560	-34

In questa tabella abbiamo modulo e fase dell'impedenza e all'aumentare della frequenza si vede come, già a 500 kHz si ha che il modulo (la resistenza) si è dimezzata.

Quindi se i valori di R sono elevati (centinaia di kohm in su) e se le frequenze vanno verso il Mhz e oltre è importante dare un'occhiata al data sheet del resistore (visto che normalmente non si fa).

SELEZIONE COMPONENTI PASSIVI

→ CONDENSATORE

Il condensatore è di solito formato da due elettrodi con un dielettrico nel mezzo ed è in grado di immagazzinare energia all'interno attraverso il campo elettrico. Il parametro d'identificazione è la **capacità C** e come per i resistori, anche qui ha senso capire il range di ricerca utile per i progettisti: si va da pF a F.

Perché non si può andare più giù dei pF?

Perché poi le capacità si confondono con le C parassite dei sistemi. Mentre non si può andare più in alto perché è limitato dalle dimensioni fisiche dell'oggetto, oltre certe dimensioni i condensatori iniziano a diventare inutilizzabili in sistemi elettronici. Negli ultimi anni però ci sono stati dei miglioramenti. La novità degli ultimi anni è rappresentata dai super condensatori, ultra-cap e altri dove, sfruttando il principio fisico del doppio strato, si è riusciti ad arrivare alle decine di farad, come ordine di grandezza. Si usano in sistemi di backup domestici oppure anche in applicazioni più recenti di tipo energetico (ibrido insieme alle batterie al litio).

Attenzione che tecnologicamente sono diversi da quelli elettrolitici anche se la forma è simile.

Il principale **parametro di vincolo** dei condensatori è la tensione di lavoro: ogni condensatore, data la sua C viene caratterizzato da una V_{max} di lavoro, di solito specificata come valore di picco.

Perché è di vincolo?

Poiché il condensatore prevede due elettrodi isolati e la V è legata al campo elettrico limite del dielettrico (quello per cui si ha la disruptura dell'isolante), ovvero alla rigidità elettrica del dielettrico.

Parametri di qualità tipici dei condensatori sono le tolleranze (che sono peggiori dei resistori); per i condensatori elettrolitici si ha la corrente di perdita come fattore di qualità. Infine ci sono i parametri parassiti ESR e ESL. Ovviamente ci saranno anche stabilità e gli altri visti per i resistori.

Prima di arrivare ad una tabella di selezione parametrica, il distributore ci dice quanti componenti per ogni tecnologia ha a disposizione a catalogo. Quindi sulla prima selezione dobbiamo avere bene chiaro l'idea di quale tecnologia è più consona per l'applicazione che stiamo realizzando:

- Aluminium Electrolytic; Niobium Oxide; Tantalum si usano per applicazioni con grandi capacità e sono polarizzati (non possiamo invertire la polarizzazione altrimenti diventano resistori e poi si bucano)
- Ceramic; Film; si usano per elettronica di segnale (con valori inferiori ai uF)
- Supercapacitors / Ultracaps / Double Layer si usano come accumulatori di energia

L'elettrolitico classico è a base di alluminio o tantalio. Ma come faccio a scegliere tra i due tipi?

L'alluminio ha maggiore densità di capacità, ovvero ha maggiore C a parità di volume, ma è il meno stabile con le variazioni di T, tempo di vita minore e range di temperature di funzionamento più basso. Infatti i migliori non superano i 105°: sembra tanto ma non lo è, poiché gli altri componenti arrivano tranquillamente a 150° e poi, questo limite, si ripercuote sulla robustezza e l'affidabilità del sistema.

Qual è l'idea su cui si fonda il principio di funzionamento del condensatore elettrolitico?

In realtà quando viene fatto non è un condensatore: si prende l'alluminio e si arrotola su se stesso, poi viene immerso nel contenitore assieme ad un elettrolita. Poi viene sottoposto ad una tensione tale da consentire la formazione, all'interfaccia elettrolita-metallo, di uno strato di ossido di alluminio, che è un isolante.

Oss. C'è da dire che in seguito all'affidabilità limitata, se ripariamo oggetti elettronici datati, la prima cosa da guardare sono gli elettrolitici dell'alimentatore.

La parte superiore del condensatore è incisa per limitare l'esplosione a causa fuga di vapore e gas.

L'ossido di niobio è praticamente solido, il funzionamento è quello dell'elettrolitico, ma non c'è bisogno di liquido all'interno, sono più stabili, arrivano a T più alte, hanno C minore e costano un po' di più.

La grande famiglia dei ceramici ha una massa ceramica (non quella del bagno) e giocando sulla composizione si può variare ϵ_r e si può arrivare ad alti valori di C. Queste C ottenute sono confrontabili con i valori di capacità degli elettrolitici, con diversi vantaggi : maggiori V di lavoro, maggiore range di Temperature, anche se la stabilità in termini di temperatura non è eccellente.

La forma più diffusa per i condensatori era quella a disco, oggi è quella a parallelepipedo. I resistori si distinguono per la marcatura, mentre sui C non c'è scritto niente, quindi senza capacimetro è impossibile distinguerli se si mischiano.

Un'applicazione tipica del ceramico è quella di affiancare i C più grandi in parallelo (elettrolitici tipicamente), poiché l'elettrolitico ha una notevole induttanza parassita e la sua capacità è limitata a frequenze non molto elevate. Quindi potrebbe capitare che inseriamo un componente con comportamento capacitivo e poi da una certa frequenza in poi diventa induttivo. Per ovviare al problema, si metteva un ceramico in parallelo, in modo che quando l'elettrolitico non aveva più un comportamento capacitivo, ci pensava quello ceramico. OSS. Il valore della capacità del condensatore ceramico non era elevato poiché bastava poco per abbassare il valore dell'impedenza parallela. Tipicamente si accoppiavano 100uF e 100nF.

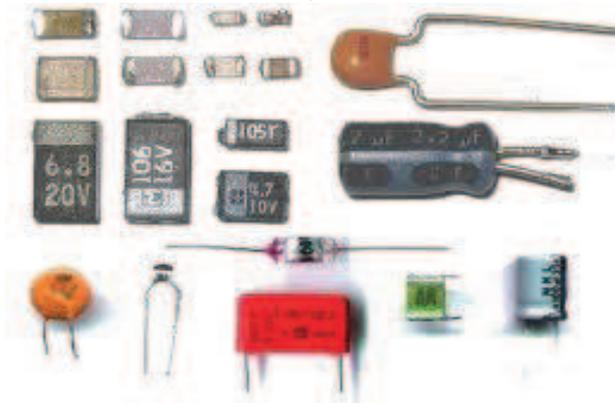
Quando si usano quelli ad alte ϵ_r , potrebbe non essere necessario quest'accorgimento visto che le frequenze di lavoro sono più elevate. In alcuni casi di circuiti lineari di progetto non aggiornatissimo, può essere pericoloso usare i ceramici ad alto k come by-pass.

Perché? Perché la presenza del C in uscita introduce un polo necessario alla stabilità del sistema. Chi ha progettato il sistema teneva conto che il C aveva una R e L parassite significative, ma i ceramici non ce l'hanno e quindi si può avere un sistema instabile. Quindi è meglio controllare sui data sheet i valori delle grandezze parassite.

I condensatori a film, hanno un film che può essere fatto di diverse materie plastiche. In questo caso l'elettrodo conduttore è applicato sul dielettrico e ci sono diverse tecniche di deposizione (sotto vuoto ad esempio). Tenete presente che fino a 10 anni fa c'era un'applicazione tipica dove si usavano 25kV (tubo a raggi catodici) quindi c'era una serie di componentistica che dovevano sopportare queste tensioni. Oggi si possono trovare questi ordini di grandezze nei sistemi di accensione comandata (per accendere la candela). Con la fine dei tv a raggi catodici è crollata la presenza di applicazioni ad alta tensione.

Come film dielettrico, oltre al poliestere, si possono usare un po' tutte le materie plastiche, e poi ognuna di queste tecnologie ha punti di forza e debolezza. Dal punto di vista della selezione è anche eccessivo come filtro, di solito non ci si sofferma sul materiale, quanto sulle caratteristiche del condensatore in termini di rispetto dei vincoli di progetto.

Ci sono diverse strutture per i condensatori sia through hole che SMT.



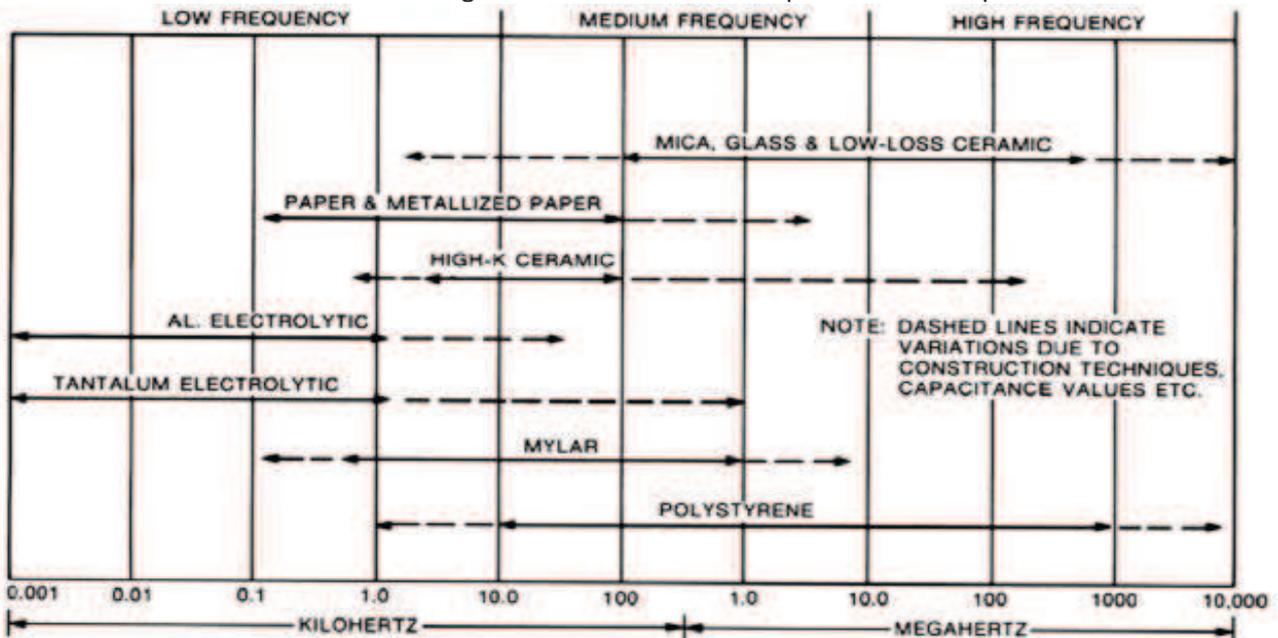
Quelli sopra sono SMT non polarizzati e sotto ci sono gli elettrolitici. Attenzione a com'è identificata la polarità: nell'elettrolitico prima c'era una banda chiara che specificava il meno, sui condensatori al tantalio

c'è un piccolo segno + sul positivo. Sul SMT c'è una barra che non sempre indica il + o il - → quindi è meglio consultare il manuale del componente.

Notate che quando si va su package 0,2 0,1 si arriva a dimensioni troppo ridotte per montaggio manuale, come si vede nella foto seguente:

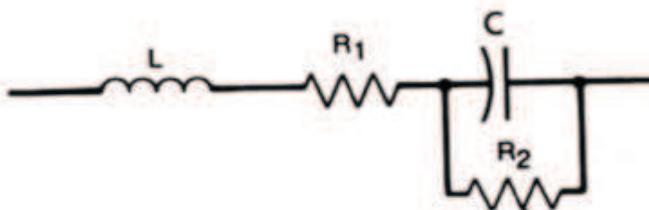


Le varie tecnologie si prestano bene a seconda delle diverse frequenze di lavoro per le diverse applicazioni. Questa è una tabella riassuntiva dei range di funzionamento in frequenza dei vari tipi di condensatori:



Naturalmente non è un dogma, ma si possono trovare di una stessa famiglia, componenti che si spingono a frequenze diverse.

Modello elettrico di un C con le sue grandezze parassite



In questo modello la R2 tiene conto delle perdite che tendono a ridurre la V ai capi del condensatore aperto (in pratica noi immaginiamo di caricare un condensatore e scolgarlo → dopo un po' di tempo sarà

diminuita la V ai suoi capi). Tipicamente nei C a film e ceramici è trascurabile, mentre per gli elettrolitici è indispensabile nel modello schematico.

Mentre L è l'induttanza parassita legata alle connessioni ed era molto maggiore quando i Condensatori avevano i piedini; sui condensatori a SMT è più ridotta la L parassita, quindi è importante che il progettista non faccia un PCB che vanifichi le caratteristiche di questi condensatori, aumentando la L parassita dovuta alle piste sul PCB.

R1 tiene conto di 2 fenomeni:

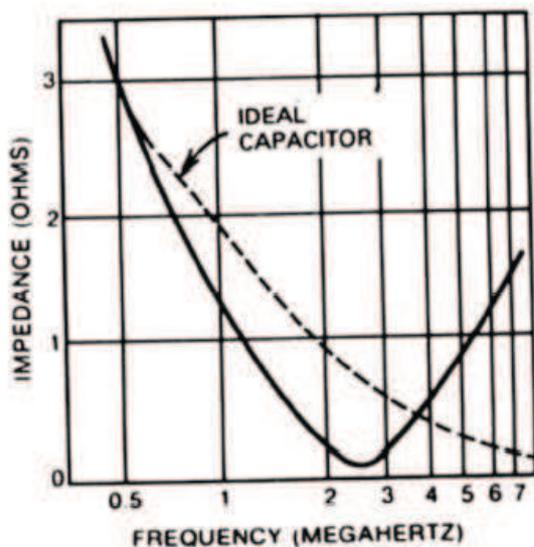
1) resistenza degli elettrodi che sono di materiale metallico

-2) delle perdite che si hanno nella polarizzazione del dielettrico. Il dielettrico è un materiale isolante le cui molecole, sottoposte ad un campo elettrico, si orientano secondo il campo elettrico e si può immaginare un effetto elastico associato a questo fenomeno. A questo comportamento elastico di allineamento dei dipoli, può essere associata una viscosità e quindi una perdita consumo in termini di corrente.

Soprattutto alle f più elevate, questa quota di dissipazione può andare a concorrere con la R1 parassita.

A volte, nei data sheet si trova, anziché R1 in ohm, la tangente dell'angolo di perdita a frequenza data.

Sul data sheet spesso si trova la curva del modulo dell'impedenza al variare di f:



Naturalmente per un condensatore ideale, in questo grafico il modulo dell'impedenza tende a zero, mentre per uno reale, dopo una certa f, il suo comportamento diventa di tipo induttivo e non capacitivo.

A volte c'è chi fa affidamento su questa risonanza serie, ma tipicamente il progettista sta alla larga dal vertice della curva e si mantiene alla sua sinistra.

Riflessione sul volume che ci aspettiamo per una data tecnologia

Per motivare queste considerazioni teniamo presente la formula della capacità:

$$C = \frac{\epsilon S}{d}$$

dove S è la superficie degli elettrodi; d la distanza fra questi ultimi; e la costante dielettrica ϵ

Sicuramente a una data tensione di lavoro è fissata l'altezza del dielettrico, in modo da non superare il campo limite, e la C varia col volume.

Mentre se fissiamo la C come varia il volume con la tensione di lavoro? Inversamente al quadrato della tensione di lavoro.

Perché? Se aumentiamo la tensione di lavoro, dobbiamo aumentare proporzionalmente la distanza tra gli elettrodi per mantenere il campo elettrico costante. Ma aumentando la d diminuiamo la C . per avere la stessa C dobbiamo aumentare l'area dello stesso fattore di cui abbiamo aumentato d . Siccome il volume è proporzionale a CV^2 , allora come conseguenza abbiamo che il volume è proporzionale all'energia immagazzinata. Questa è una riflessione interessante soprattutto nel range dei supercondensatori.

DIMOSTRAZIONE CHE V_{OL} è proporzionale a $C \cdot (V^2)$:

$$W = \frac{1}{2} CV^2$$

dove

$$C = \epsilon \cdot \frac{S}{d}$$

$$V = E \cdot d$$

Quindi

$$\frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \cdot \epsilon \frac{S}{d} \cdot E^2 \cdot d^2 \Rightarrow V_{OL} = S \cdot d \propto CV^2$$

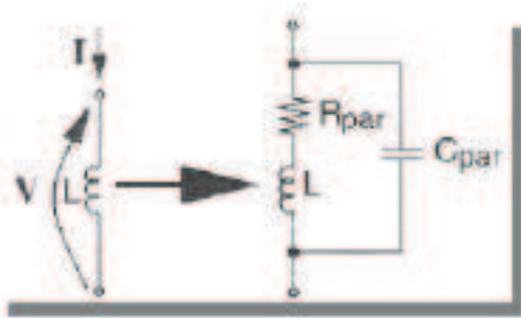
SELEZIONE COMPONENTI PASSIVI

→ INDUTTORE

Nell'elettronica classica, soprattutto in banda base, si usano poco se non come trasformatori o per applicazioni con induttanze elevate. Cos'ha dato nuova vita agli induttori per cui oggi potremmo utilizzarli? L'avvento degli alimentatori a commutazione, proprio perché la possibilità di usare la caratteristica inerziale con la corrente, può essere sfruttata per realizzare, con opportune tecnologie, dei convertitori DC-DC. Quindi l'avvento degli induttori è stato aiutato dallo sviluppo dei MOS-FET. Quali sono le strategie di miglioramento tecnologico degli induttori? Sono su due fronti:

- 1) sul fronte dei materiali → si cerca di realizzare dei ferromagneti con particolari valori di permeabilità
- 2) cercare di applicare tecnologie di fabbricazione utilizzate anche per altri componenti, che riducano il costo e la complessità di avvolgere un conduttore tipo un filo.

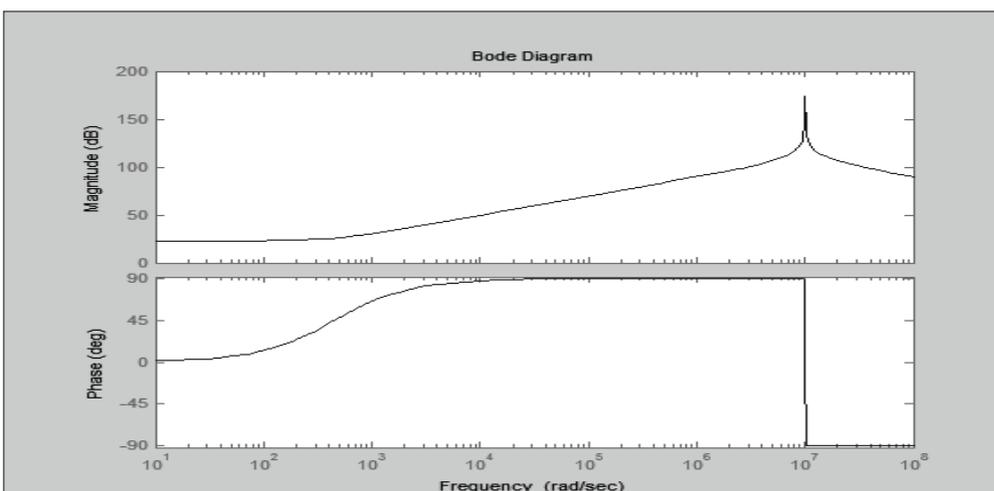
Modello equivalente con grandezze parassite



$$Q = \frac{|X|}{R_s} = \frac{|B|}{G_p}$$

$$Q = \frac{\omega L}{R_s} = \frac{R_p}{\omega L}$$

L'induttore, più di altri componenti, è afflitto da R e C parassite, sono significativi e sono limitanti fisicamente per la realizzazione di alcuni valori di L. Ogni volta che si cerca di intervenire su L, ci troviamo ad avere un R associato alla L che abbiamo realizzato. Proprio per questo motivo il parametro fondamentale che è il **fattore di qualità Q** non riesce ad andare oltre certi valori: attorno alle unità. OSS. La resistenza parassita fisicamente è in serie, quello nel disegno è il modello parallelo del sistema. In questo grafico si vede che con la capacità parassita tra gli elettrodi, si avrà che dopo una certa frequenza



in poi, si avrà un comportamento capacitivo. I valori che si riescono ad ottenere operativamente sono 10/100 nH e mH.

Nell'ambito degli induttori, si trova una grossa **differenza rispetto al circuito magnetico**:

- 1) induttori in aria,
- 2) induttori avvolti su materiale ferromagnetico.

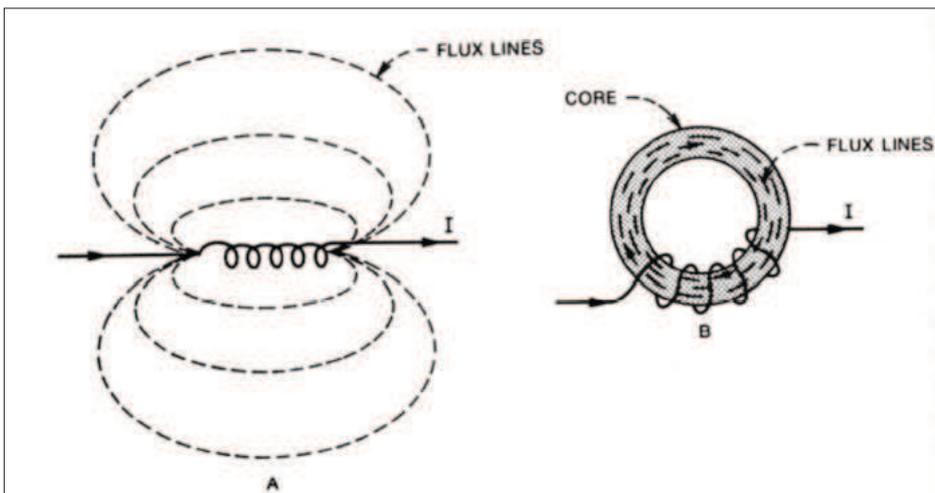
Per gli induttori avvolti su materiale ferromagnetico abbiamo una ulteriore distinzione:

- a circuito aperto
- a circuito chiuso

Perché questa classificazione? Quelli in aria che hanno valori bassi perché non possono contare sulla permeabilità della ferrite, non presentano tutte le classiche controindicazioni dei ferromagneti (μ varia con h). Inoltre c'è il problema della saturazione: se superiamo un certo valore di flusso all'interno dell'induttore, il materiale ferromagnetico presenta un $\mu \rightarrow 0$. Quindi l'induttore, all'aumentare del flusso interno ha un'induttanza che crolla. Quelli in aria sono immuni da questo problema.

Come avere un compromesso tra induttanze maggiori e minori rischi di saturazione? Si lascia un traferro. Perciò sono stati introdotti quelli a circuito aperto, come gli induttori E-I

Una prima differenza fra le due tipologie è sulla relazione che c'è fra induttore e mondo circostante:

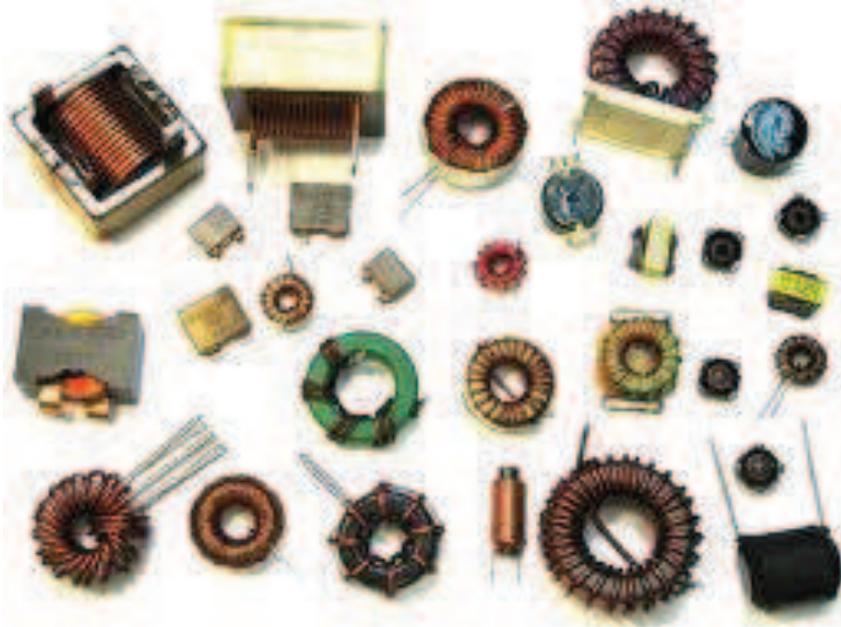


Un induttore in aria perturberà di più l'ambiente circostante con le sue linee di campo elettromagnetico. Mentre per gli induttori con ferromagnete, anche se in presenza di traferro (se il traferro è nel nucleo), c'è una minore perturbazione dello spazio circostante.

OSS. Gli induttori avvolti in aria sono sorgenti di maggiore disturbo, quindi quando in un circuito, dove ci sono frequenze elevate, ci sono più induttori in aria, allora si posizionano perpendicolarmente per ridurre l'accoppiamento reciproco, però non risentono dei campi elettromagnetici esterni.

Gli induttori avvolti su nucleo ferromagnetico, non disturbano il campo vicino, però per contro essendo una regione di alta permeabilità, tutti i campi esterni tendono ad essere convogliati all'interno.

Qui vediamo un po' come sono fatti gli induttori:



C'è tutta una serie di soluzioni toroidali, che però hanno un grande problema costruttivo: la forma toroidale è la migliore per ottenere valori di induttanza elevati, però sono soggetti a saturazione e perciò occorre fare attenzione a non farci entrare la continua (ad esempio quando si usa come induttanza di blocco → induttore di choke).

Questi sono ferromagnetici con una parte aperta:



Altri, come questi, sono SMT:



Aspetto interessante: il circuito elettrico interno viene ottenuta con tecnologie tipiche delle costruzioni elettroniche. Si usa come elemento conduttore un circuito multi strato, avendo a disposizione tecnologie che arrivano fino a 48 layer. Quindi anche con 10 spire per livello, possiamo avere 500 avvolgimenti con il vantaggio di utilizzare una tecnologia planare e con un unico processo si riesce a realizzare la bobina.

Per far costare di meno i toroidali, l'unica strategia è utilizzare processi meccanici.

Tecnologie per la costruzione di sistemi elettronici

Prima di analizzare gli elementi caratteristici del progetto geometrico è bene fermarsi un attimo e vedere quali sono le tecnologie alla base della realizzazione dei PCB. Le tecnologie sono tante e fanno parte delle cose da scegliere quando si affronta una costruzione elettronica.

Naturalmente ci stiamo focalizzando su un livello intermedio importante, ma che non esaurisce il problema... ci sono altri corsi che prendono in esame la costruzione del componente ma a noi non interessa.

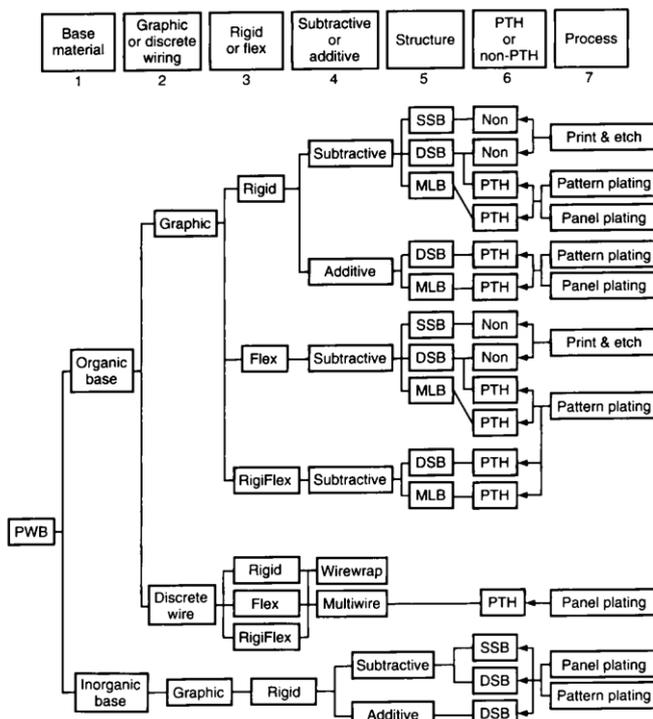
Esistono possibilità molto interessanti a livello di package o di modulo oppure di progettazione direttamente sul silicio (ASIC);

La soluzione maggioritaria prevede i COTS (Commercial off-the-shelf), ovvero il componente viene comprato e poi avviene l'assemblaggio su scheda che è detta circuito stampato (PCB) che esaurisce il sistema elettronico.

Su questa linea ci focalizziamo noi.

Oggetti di fascia più complessa possono essere i sistemi elettronici distribuiti (ad es. sistemi di controllo di turbine che data la loro estensione necessitano di sistemi elettronici distribuiti con tante parti elettroniche e una strategia di network tra le varie parti). Questo modo di gestire un sistema in maniera modulare avviene attraverso dei **rack** e comporta le relative problematiche di connessione tra le varie parti comprendenti il sistema.

Classificazione PCB



Se ci concentriamo sul **PCB** possiamo individuare un tentativo di classificazione.

1) Classificazione in base al materiale con cui si fa la scheda

- ORGANICO : si usano composti polimerici (resine) a base di carbonio;
- INORGANICO: si usa un metallo (tipicamente alluminio);
- IBRIDO : si usano entrambe i composti organico/inorganici e queste strutture vengono impiegate per la dissipazione di grandi potenze, infatti la parte metallica favorisce la dissipazione e la parte organica invece favorisce l'indispensabile e ovvio isolamento

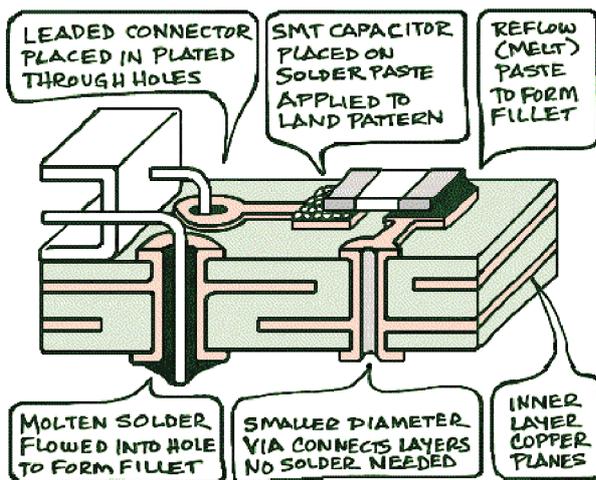
2) Definizione grafica delle geometrie o fili discreti. Quest'ultimo filone consiste nello stendere fili smaltati e annegati all'interno di una resina che poi veniva polimerizzata. Oggi questa tecnica è obsoleta.

La classica strada che affrontiamo noi è quella della definizione grafica della geometria dei connettori (vengono disegnati)

- 3) I supporti e le connessioni possono rientrare nella classificazione rigidi flessibili (ad esempio all'interno degli scanner ci sono delle logiche flessibili, che assicurano una maggiore resistenza nel tempo del sistema elettronico) o ibridi
- 4) Tipologia di definizione delle geometrie ..qui la classificazione è un po' più strana...ci sono 2 modi per fare una forma nello spazio
 - ADDITIVO : dove si apporta materiale per fare l'oggetto (filosofia del vasaio)
 - SOTTRATTIVO: dove si toglie materiale per fare l'oggetto (filosofia dello scultore che fa nascere l'opera d'arte dal blocco grezzo). Nel nostro caso si parte da un laminato conduttore e si fanno degli attacchi, con degli acidi particolari (in fase di ETCH), per eliminare le parti che non servono
- 5) Multiwire e wirewrap sono due sistemi utilizzati fino ad una ventina di anni fa. Con questo tipo di socket con piedini quadrangolari e un wrapper particolare, si creavano delle connessioni attorcigliando un filo di rame sottile attorno ad ogni piedino. Questo sistema era delicato, poiché l'ossidazione del rame, col tempo, modificava un po' le proprietà elettriche del sistema.
- 6) La Struttura ci dice come sono organizzate nello spazio queste piste
 - single layer
 - double layer
 - multi layer

che è determinante e per i costi e per i criteri di collegamento dei componenti.
Ora si arriva a fare multi layer fino a 50 strati .

7) **PTH (plated through hole)** in italiano si traduce con **foro passante metallico** ed è essenziale quando si lavora su più layer per capire che tipo di connettività ho tra i layer.



I layer sono interconnessi tra loro ossia non si può passare tra i vari strati senza passare per un altro strato.

8) L'ultima colonna ci dice quali sono i processi con cui fare i pcb

NOTA: la potenza del PCB sta nel fatto che ho a disposizione un processo che mi ripete tutti gli stessi circuiti uguali all'originale un numero illimitato di volte; mentre prima c'era la persona che saldava ogni componente.

Differenze tra montaggio TH e SMT

I package devono essere compatibili con le dimensioni dei fili di collegamento e la collocazione dei componenti ha senso soltanto su un unico lato. Infatti inizialmente erano bene distinti i due lati:

- **Component** (TOP)
- **Solder** (BOTTOM)

Il progetto, una volta non era un limite, ma è iniziato ad esserlo con l'avvento dei dispositivi logici programmabili: all'aumentare del numero dei piedini dei componenti nacque il problema della quantità di buchi da fare sul PCB, tenendo presente che un foro passante metallizzato costituisce una barriera. Infatti immaginate di avere un micro con una barriera di 30 piedini per lato su un PCB: sarà difficilissimo passare delle metallizzazioni da una parte all'altra, occorrerà passare attraverso 2 piedini del micro. Tant'è vero che uno dei modi con cui si qualificava la qualità di un processo TH era il numero di piste che si riuscivano a far passare fra 2 piedini a 2,5 mm di distanza.

Naturalmente il piedino metallizzato impone una tolleranza abbastanza stretta fra il sopra e il sotto, nel momento in cui si passa al dual layer. Esiste in una certa misura questo problema, anche per gli SMT, ma soprattutto per i layer interni, dove non sono poggiati i componenti e poi il vincolo è più blando: basta che non si creano cortocircuiti.

In realtà l'affermazione della tecnologia a montaggio superficiale è dovuta essenzialmente alla **facilità del montaggio dei componenti da un punto di vista tecnologico**. Infatti il passo successivo alla realizzazione del pcb, prevede il montaggio dei componenti: quando l'automazione industriale ha iniziato a pensare di robotizzare la fase di posizionamento dei componenti è apparso chiaro che, il TH, con l'esigenza di infilare un terminale in un foro, non era la soluzione migliore da gestire. Infatti c'erano dei problemi nel momento in cui aumentavano il numero di piedini da inserire e aumentava la probabilità che un piedino si piegasse in fase di installazione e il circuito non funzionasse.

Prima di questo processo di automatizzazione del sistema di produzione dei pcb, le saldature venivano fatte in due modi:

- **Pozzetto**: c'era un pozzetto di stagno fuso dove veniva poggiata per alcuni secondi la scheda opportunamente trattata con degli agenti chimici (**flussanti**), che favoriscono la saldabilità eliminando lo strato di ossido dai conduttori su cui deve aderire la lega di saldatura. Questa tecnica era molto costosa.
- **Onda**: c'erano delle pompe che tenevano in moto delle onde di materiale di saldatura fusa. Su quest'onda venivano fatte scorrere le schede e quando il piedino e la piazzola venivano immerse nell'onda si creava la saldatura.

Dopo l'automatizzazione si è passati alla

- **Saldatura a riflusso**: prevede l'uso di una pasta adesiva, contenente le particelle della lega di brasatura. Il componente si piazza sopra questa pasta e il tutto viene messo in forno, finché la pasta crea la connessione. Questa tecnologia è più pulita e lineare e la stesura della **solder past** avviene attraverso metodologia stencil.

Adesso vediamo i principali processi tecnologici che servono per realizzare un pcb: **NON VANNO PENSATI COME UNA SEQUENZA!** Sono vari processi per ora, ognuno per conto suo. Poi cercheremo di capire come metterli in ordine per riuscire a fare un pcb con certe caratteristiche. Il **substrato laminato** viene realizzato in due modi:

1) attraverso l'alternanza di resina epossidica (adesiva) e tessuto di fibra di vetro (vetronite); il tutto pressato a temperature dell'ordine dei 100°

2) appoggiano una lamina di rame sulla resina epossidica, che grazie alle sue proprietà adesive fissa il tutto.

OSS. Oltre alla fibra di vetro, c'è una soluzione molto adottata in ambito consumer (anche per marche "buone"), dove spesso si usano supporti tipici diversi, basati su carta e molto più economici.

OSS. Spesso per processi più semplici, il fornitore di tecnologia non si impegna nel processo di laminazione, poiché è un processo abbastanza impegnativo, ma parte da semilavorati prodotti già da altre aziende del settore.

Anche per realizzazioni fast prototipe o semi hobbistiche, sono presenti questi semilavorati dotati o meno della stesura del fotoresist.

Nelle due fasi successive è racchiuso il nucleo del processo litografico per la realizzazione di un PCB:

→ **Disegno delle geometrie (imaging)**

→ **Stesura del fotoresist, esposizione, sviluppo**

Si intendono le piste, percorsi che vanno da una piazzola all'altra, che vanno trasferiti sulla lamina di rame. Questo processo è complesso e simile a quello che si usa per la realizzazione dei circuiti integrati.

Normalmente consiste in una deposizione di materiale fotosensibile (positivo o negativo a seconda della reazione che si può indurre con l'esposizione ad una sorgente di luce UV) e le alternative di scelta sono: semilavorati con fotoresist già steso; semilavorato con la lamina di rame e poi il fotoresist si può depositare in due maniere:

- 1) Spry (metodo più grossolano)
- 2) Spinning (più preciso e industriale: si fa gocciolare il fotoresist sul semilavorato posto in rotazione e poi viene fatto asciugare in un forno)

Una volta ottenuto il supporto occorre una **maschera**: occorre trasferire il disegno delle piste su un supporto trasparente agli UV, in modo tale che le connessioni, che vogliamo costruire sul rame, siano opache rispetto ad una maschera trasparente. In questo caso si parla di maschera positiva, oppure si può fare il viceversa. Quindi c'è tutta una tecnologia legata alla realizzazione delle maschere. Le maschere più piccole sono in fogli di acetato e industrialmente invece sono di vetro e la maschera è ottenuta con deposizioni metalliche, se ovviamente deve essere usata un milione di volte.

Una volta creata la struttura con i diversi strati (dal substrato al master sul foglio acetato) si inserisce il tutto nel **bromografo**, ovvero la macchina che serve per l'esposizione ai raggi UV. Anche qui ci sono diversi livelli di macchine: a livello base, si tratta di neon UV semplici, per i sistemi industriali si utilizzano lampade al vapore di mercurio e oggetti più sofisticati. Qui si effettua un'esposizione a tempo controllato e la radiazione, interagendo con il fotoresist, catalizza una reazione chimica per cui il fotoresist esposto, in fase di sviluppo verrà poi eliminato.

Alla fine di questo passaggio abbiamo il laminato e il fotoresist che ha la forma delle piste, si dice che abbiamo **definito le geometrie**, ovviamente se lavoriamo su 2 lati, abbiamo un serio problema di allineamento. In lavorazioni industriali si affronta questo problema con dei fori di marcatura, riuscendo ad avere almeno due fori di riferimento fra i due layer.

Un altro processo importante è la **foratura**: questa è importante sia nei processi TH, per creare i buchi dove vanno infilati i conduttori, che nei processi SMT per creare le vie, ovvero i passaggi dove dovremo collegare layer superiore e inferiore.

La **foratura meccanica** è la tecnica più utilizzata per la foratura di un PCB, ovviamente i materiali e i macchinari sono sofisticati, a controllo numerico, multiteste. Le problematiche della foratura meccanica sono legati alla modalità con cui la punta opera, infatti la punta crea truciolo, quando opera applica una forza e in uscita lascia una superficie slabbrata.

Come si risolve? Normalmente questo problema si affronta non forando il singolo laminato sul piano XY, ma una decina, in modo da farne 10 in un colpo solo e poi sopra e sotto si ci mette uno strato di materiale sacrificale, in modo che quello che si slabbrata non è PCB.

Per micro fori (sotto i 4/10) è possibile usare laser, ultrasuoni o ad acqua pressata. Il problema di queste tecniche più sofisticate riguarda come viene lasciato poi il materiale: ad esempio il laser fa evaporare il materiale e subisce delle modifiche per cui non va bene il PCB per il passaggio successivo di lavorazione, quindi devono essere introdotte altre fasi di processo.

Comunque le tecnologie dominanti sono foratura meccanica e laser (per alcuni processi).

Uno dei problemi che si manifesta durante la realizzazione di un PCB è legato alla **metallizzazione dei fori passanti**.

Quale strategia si usa?

Quello che serve è avere un processo che possa permettere la deposizione di atomi di metallo su supporto isolante, quali la **deposizione elettrochimica**. Se abbiamo già una superficie conduttrice è facile placcare con ulteriore metallo: basta avere un sale contenente ioni del metallo che ci interessa, immergere gli elettrodi, far passare corrente e dove lo ione metallico riceve le cariche, che lo rendono neutro, si deposita. Si ottengono superfici di qualità buona, non ottima. Con questa tecnica si realizzano tutte le tecniche di placcatura. Il problema di questa tecnica è che occorre che la superficie dove si vuole depositare il metallo sia già conduttrice e la vetronite non lo è. Normalmente si usa polvere di grafite per fare la deposizione (hobbistica). Industrialmente si fa un'operazione di stripping sulle pareti del foro, in modo che il foro sia pulito e ruvido. Dopo si fa una deposizione chimica che lascia uno strato di palladio anche su superfici isolanti. Poi si può passare alla deposizione elettrochimica, con una avvertenza però: tutti i fori devono essere allo stesso potenziale. **Questo è importante perché vuol dire che la deposizione della metallizzazione nei fori non si può fare quando ci sono già le piste, altrimenti i fori sono già separati elettricamente.**

Un altro processo importante è quello dell'**etch chimico** per eliminare il rame in eccesso: a livello industriale non sappiamo con esattezza come avviene il processo (nemmeno sui migliori libri viene scritto il processo nel dettaglio, ma si dà un'idea). Per gli attacchi per piccole produzioni si usa il cloruro ferrico, dove il ferro prende il posto del rame e quest'ultimo precipita sul fondo della soluzione salina.

Altrimenti industrialmente si usa un ossidante (acqua ossigenata) e un attacco acido (acido muriatico).

Quindi a livello industriale un grande problema è relativo allo smaltimento corretto di queste sostanze utilizzate nei processi.

Nel caso di processi multistrato occorre avere necessariamente la pressa per fare i diversi strati, non bastano i semilavorati. Il processo di metallizzazione dei fori può essere eseguito sulla singola coppia di strati, oppure per mettere in comunicazione dal primo all'ultimo strato.

Adesso non basta aver creato il supporto con tutte le piste (sopra, sotto e dentro), ma occorre iniziare a preoccuparsi di come verranno inseriti i componenti. Quindi un passaggio importante, ora sempre più applicato, è l'applicazione di uno strato polimerico resistente ad alte temperature, che protegga le regioni del pcb, dove non ci va attaccato nulla, dai passaggi di saldatura.

Questo strato era particolarmente importante e significativo, nei processi a onda, poiché senza **solder resist**, la riga di saldatura avrebbe creato dei cortocircuiti, mentre è utile nei processi a riflusso, poiché limita le anomalie, dovute ad una deposizione sbagliata della **solder past**, che serve a creare i contatti per i componenti SMT.

Questo passaggio è semplice e può avvenire in due modi: si può depositare in forma liquida il solder resist oppure in film, o in forme di tipo serigrafico.

Un passaggio, anche questo fondamentale, è la **scontornatura e eventuale apertura di cave**: se guardiamo un PCB, spesso ha forme strane e queste vengono realizzate con frese a controllo numerico. Inoltre con queste frese si separano anche le diverse schede, realizzate su una stessa lastra di 1m² di supporto.

Se proviamo a fare questa operazione si nota che è meno banale di come sembra: il problema tipico di questa fase è che quando con la fresa si ritaglia un pezzo interno alla lastra, questo via via che la fresa consuma il materiale circostante, rimane sospeso in aria e vibra. Tipicamente alla fine del taglio, il pezzo centrale si mette di traverso e spezza la fresa.

Come si risolve il problema?

Tipicamente ci si preoccupa che il dentro e il fuori in realtà non vengono mai completamente separati, si lasciano sempre dei peduncoli, che mantengono fino all'ultimo il pezzo da rimuovere attaccato alla lastra.

Questa fase è gestita da un CAD e poi il taglio dei peduncoli avviene con un'altra macchina.

A questo punto ci sono anche dei processi importanti per garantire la resa dell'intero processo, poiché ci possono essere dei difetti sul prodotto finale (ad esempio graffi sul fotoresist, sottoesposizione, sovraesposizione). Di solito i processi fatti da produttori su scala provinciale hanno rese del 90%. Normalmente al di fuori del campo hobbistico deve essere previsto il **test della scheda nuda**: ovvero

occorre verificare l'assenza di cortocircuiti e di interruzioni. È indispensabile per schede multilayer prima di sovrapporre tutti gli strati, perché altrimenti se una pista nel substrato è interrotta, poi non ci si può fare nulla.

Come avviene il test della scheda nuda e quali sono le macchine?

L'elemento d'interfaccia per fare il test è l'ago, un elemento conduttore contenuto in un cilindro cavo con una molla. Col passare degli anni, questi aghi sono sempre più piccoli, dorati, di varie forme.

Esistono due tipi di approcci:

1)**per piccole produzioni:** simile a quello che useremmo noi a mano, ovvero con un multimetro verifichiamo tutti i collegamenti. Così fanno le macchine a controllo numerico su piano XY. Il problema è che all'aumentare del numero di pezzi per scheda, il costo di questo collaudo diventa inaccettabile, poiché sarebbe troppo alto il costo del test per ogni singola scheda.

2)**per grandi produzioni:** si usano dei letti di ago: strutture con matrici di aghi, si ci poggia la scheda e le tecniche di verifica avvengono in parallelo, ma quali sono i problemi che si manifestano: inizialmente si poteva pensare di avere i pad su una matrice con passo di 2,54mm e poi il letto era settato con lo stesso passo, quindi non ci sarebbero stati grandi problemi per effettuare il test. Ma se osserviamo i PCB di ora, i package SMT hanno piedini vicinissimi ed è impensabile avere un letto d'aghi con un passo di 0,02 mm. Allora in questo caso si è scelto di realizzare una scheda di personalizzazione: su un letto d'aghi standard si è scelto di disporre una struttura atta alla verifica di una particolare scheda. Se poi la scheda cambia, va rifatto questo supporto, quindi si tratta di un costo non ricorrente, che si abbatte se produco un milione di schede.

A questo punto c'è da assemblare i componenti: le fasi di **posizionamento** e **saldatura** sono collegate. In questo caso si utilizzano tutte macchine robotizzate e il successo del SMT è proprio relativo alla maggiore semplicità di posizionamento dei componenti. Tipicamente anche qui ci sono due settori:

ci sono macchine per il posizionamento dei passivi che posizionano 10 componenti al secondo (più di 20000 all'ora) e non si riescono a seguire a occhio nudo. Gli integrati di solito vengono gestiti con macchine diverse, più lente ma più sofisticate, ci vuole qualche secondo per piazzare un componente (si scende sui 1000 all'ora) e c'è anche una telecamera per l'ispezione visiva, che controlla che il posizionamento sia corretto.

Una volta avvenuto il posizionamento dei componenti si usa una **saldatura** a riflusso. Una cosa interessante, che non è banale, è che occorre garantire un opportuno profilo di temperatura dove il tempo con cui si raggiunge la temperatura di saldatura sia controllato. Infatti nei datasheet degli SMT, infondo ci sono una serie di informazioni proprio relative all'assemblaggio (**profilo tecnico**).

In ogni caso quindi i sistemi di saldatura devono garantire, non solo il raggiungimento della temperatura, ma anche l'ottenimento di una certa curva di Temperatura nel tempo, ad esempio dosando energie e cambiando l'approccio alla saldatura: in pratica si creano zone a diverse temperature e poi viene spostata la scheda, in modo tale che il profilo di T lo otteniamo tramite lo spostamento della scheda.

Un'altra fase che caratterizza la realizzazione di PCB è la **pulizia della scheda dai residui di saldatura**: in tutti i casi, affinché la brasatura avvenga, il materiale fuso deve bagnare sia il supporto sia il piedino. Bagnando entrambi, deve rimanere uno strato sottile di lega (non doppio, poiché la resistività dello stagno è elevata). Affinché la saldatura avvenga occorre che sia il pad, sia il piedino siano attorno ai 300°, per permettere allo stagno fuso di bagnare entrambi e le due superfici devono essere pulite (no ossido superficiale). Il problema dell'ossidazione è più grave, ma come si risolve? Sia chi fa il PCB, che la scheda, cerca di adottare delle finiture superficiali delle piste e dei piedini, che difendano il piedino dall'ossidazione, ma nonostante questo il tempo di saldabilità di una scheda è limitato. In ogni caso, in fase di saldatura si usano degli agenti chimici che rimuovono l'ossido sulle superfici e si chiamano **flussanti**. Nella saldatura manuale, tipicamente il flussante è nell'anima del filo che stiamo usando per saldare. Il problema legato ai

residui è che i residui di fluxante che rimangono, cristallizzano e sono aggressivi, poiché corrodono i conduttori ed elettricamente sono isolanti, perciò vanno eliminati.

Ci sono diverse soluzioni per ovviare questo problema: ci sono delle lavatrici che usano dei solventi particolari oppure oggi tecnologicamente c'è una categoria di fluxanti che si chiama **no clean**. Sono dei fluxanti, che dopo l'attivazione restano inerti sia elettricamente, che chimicamente, resta solo il problema estetico.

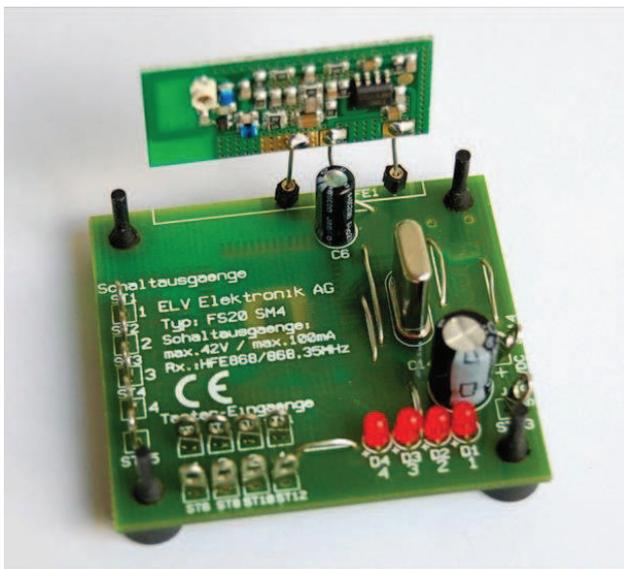
Dopo l'operazione di saldatura si arriva al **collaudo**: un test elettrico a questo livello è problematico, poiché si va nella sfera del collaudo di sistemi montati e non può essere fatto senza il progettista del circuito, anzi lo stesso test di verifica è progettato dal progettista della scheda e del circuito. È abbastanza difficile proporre ad un fornitore di tecnologia un controllo gratuito, a meno che non si siano utilizzati degli standard di controllo strutturale, tipo JTAG, che prevedono la possibilità di somministrare delle lunghe sequenze di bit e leggere dei risultati e confrontarli con misure di riferimento.

Quello che fanno tutti è l'**ispezione visiva**: non vuol dire che a occhio si vede cosa c'è o meno, ma avviene in forma automatica, con delle videocamere che riprendono il sistema e le immagini riprese, vengono elaborate automaticamente, confrontate con un demo corretto del montaggio, tutte le difformità vengono analizzate ed eventualmente presentate al decisore (che è umano).

Spesso ci sono tracce di rilavorazione sulle schede (anche quelle nuove), una **patch** di reparto. Tenete presente però che ci sono settori, dove ciò non è ammesso: ad esempio nei reparti di produzione di elettronica per automotive, poiché la rilavorazione presuppone un decadimento dell'affidabilità del sistema. Per strumenti sofisticati invece, come gli strumenti di laboratorio, quasi sempre sono presenti processi di rilavorazione, vista la loro complessità.

Visto l'insieme dei processi iniziamo a ragionare su come metteremo insieme questi processi per realizzare alcune tipologie di produzioni.

PRINT & ETCH SINGLE LAYER



Si parte già da un semilavorato (laminato con rame su un lato), si definiscono le geometrie delle piste seguendo l'insieme delle regole vista:

- stesura fotoresist
- esposizione
- sviluppo
- pulizia
- attacco del rame
- rimozione fotoresist

A questo punto siamo giunti ad avere il PCB con le piste sopra. Ora c'è una fase si **serigrafia (silk screen)**: ovvero il processo con cui si effettuano le scritte sulla scheda.

Ma perché silk screen?

Perché tradizionalmente la tecnica si otteneva partendo da un tessuto di seta (ora si usano materiali più economici) e le regioni dove si desideravano le scritte, si ottenevano facendo sciogliere con uno stilo caldo la cera per rendere lo schermo di seta permeabile. Dopo di che si appoggiava lo schermo sulla scheda, e con una spatola si stendeva un inchiostro, che penetrava attraverso le zone permeabili e veniva stampata la scritta.

A questo punto si può

- forare
- fresare
- scontornare

E abbiamo ottenuto le nostre schede single layer con i peduncoli tutti attaccati.

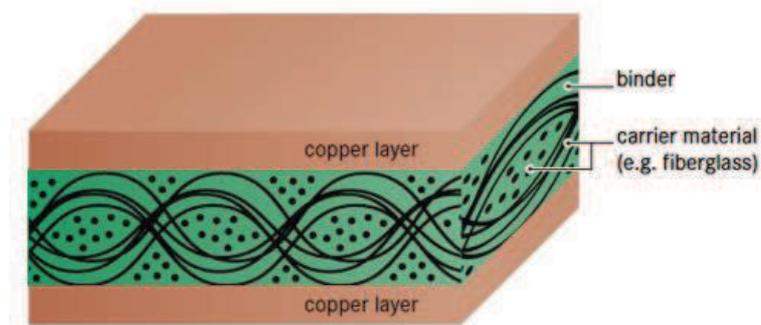
A questo punto viene prevista una finitura per la saldabilità: quindi il produttore ci chiede che tipo di finitura vogliamo e tra le più gettonate c'è la **HAL (Hot Air Levelling)**, che è deposizione di stagno ad alta temperatura; ppure vengono stese delle pellicole protettive organiche a base di sostanze solventi.

Infine

- stesura solder paste
- assemblaggio

Quindi il Print & Etch è abbastanza semplice e l'unica cosa che possiamo notare è che la fase di foratura è abbastanza avanti nel processo.

DOUBLE LAYER

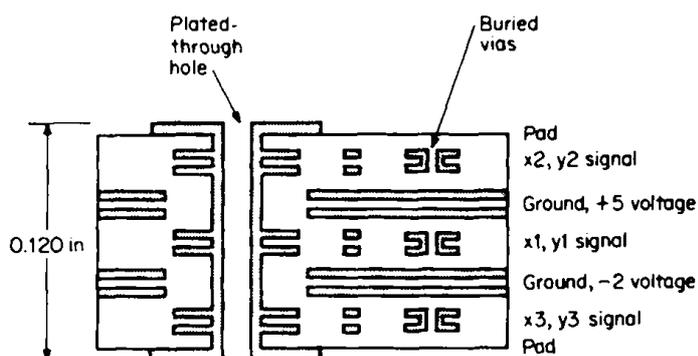


I pcb doppia faccia sono più sofisticati e la grossa differenza è proprio nella fase di foratura, che si fa all'inizio e alla cieca. Si fanno subito i buchi a controllo numerico, è ovvio che la macchina ha le coordinate dei fori. Poi si passa a metallizzare i fori con flash chimico e deposizione. La deposizione ha un effetto benefico, poiché aumenta lo spessore del rame di partenza, che è un

parametro importante nella realizzazione dei pcb. Vedremo, che ha un doppio effetto: è importante elettricamente, poiché determina la conducibilità delle piste, mentre la geometria delle piste (larghezza e lunghezza) le decidiamo noi, lo spessore lo sceglie il tecnologo. Naturalmente più è alta la pista e migliore è la conducibilità e inoltre ha un grosso impatto sulla conduzione del calore, quindi quando si fanno PCB di potenza, occorrerà tenere presente anche di questo aspetto.

Dopo questa prima fase, si definiscono le piste sui due lati nel solito modo, con problemi di allineamento ed esigenze di proteggere i fori che abbiamo metallizzato (il fotoresist deve proteggere anche i fori oltre che le piste). Poi si va avanti come per il Print & Etch; si possono montare i componenti su una o su entrambe le facce, tenendo presente sempre il costo delle fasi di processo.

MULTILAYER



Per il multilayer occorre avere a disposizione un buon processo dual layer accurato. Immaginiamo di volere fare un 24 layer: per farlo dovremo avere 12 dual layer e in mezzo a questi 12 avremo 11 regioni dove inserire del laminato per fare la struttura finale ottenuta mediante la pressa ad alta temperatura. Il problema è che mentre si fa la laminazione di questo strato viscoso (poiché la resina epossidica è la colla per i

componenti), occorre fare attenzione all'allineamento degli strati affinché rimanga quello di partenza.

OSS. Non è detto che tutti i produttori realizzano fori metallizzati tra layer, ma è possibile che alcuni produttori decidano di realizzare solo fori metallizzati passanti, ovvero quei fori che attraversano tutti i layer. Naturalmente un processo così è un po' monco. Quelli migliori sono quei processi dove ogni singola coppia di layer ha i suoi fori metallizzati e sono più costosi. Inoltre le vie interne sono definite **vie sepolte** e a seconda di com'è fatta la tecnologia, possiamo fare fori tra coppie qualsiasi, ma non possiamo pensare delle vie tra strati non adiacenti. Quindi le uniche interconnessioni tra layer e layer si hanno tra layer adiacenti e la stessa coppia dello stesso doppia faccia di base. Quindi noi dovremo sapere com'è fatto il processo per potere disegnare le piste.

Una volta laminato e cotto il tutto quello che si ottiene esteticamente è l'aspetto di un doppia faccia, però per riconoscere un multilayer da un dual sided pcb si può mettere la scheda in contro luce. Infatti nei Doppia faccia, le zone dove non ci sono piste di rame ma vetronite sono trasparenti; mentre per i multilayer, vengono introdotti dei piani di massa fra i diversi strati, ovvero strati di materiale conduttore non trasparente, quindi non passa la luce.

Nella figura in alto c'è un grande foro passante che comprende tutti gli 8 strati della struttura. Tra gli 8 strati si evidenziano le diverse funzioni :

3 strati per segnale

2 alimentazione

3 ibridi (sia alimentazione che segnale)

I 3 grandi problemi di cui dovremo tenere conto in fase di realizzazione del progetto geometrico del PCB sono:

1)**Integrità dei segnali:** occorre garantire l'integrità dei segnali sia rispetto ai disturbi prodotti che alla propagazione della forma del segnale nel tempo.

2)**Effetto Joule:** porta la produzione di calore sia nelle piste stesse, che nei componenti attaccati ad esse, quindi occorrerà capire come smaltire questo calore in eccesso per non surriscaldare il sistema.

3)**Compatibilità elettromagnetica:** dovuta al fatto che le correnti con cui lavoreremo sono variabili nel tempo e sono influenzate dalle capacità e induttanze parassite che si creano tirando le piste sul PCB. Quindi alcune piste attraversate da correnti variabili creeranno dei disturbi elettromagnetici ai dispositivi che sono intorno.

CHI FORNISCE LA TECNOLOGIA?

Normalmente noi abbiamo gli strumenti di progetto, ci occupiamo delle varie tematiche in modo da descrivere completamente la costruzione che abbiamo in mente, che rispetta le nostre specifiche. Ora occorre valutare come trasformare il file d'uscita del CAD in un oggetto fisico. Esistono tecniche "domestiche" per realizzare un pcb, più o meno professionali, che elegantemente vengono definite come tecniche di **FAST-PROTOTYPING**.

Si tratta di soluzioni che privilegiano la velocità di esecuzione e si adottano tutte le volte che la complessità non richiede una grossa sofisticazione e soprattutto se vogliamo verificare delle idee di progetto di cui non siamo sicuri (prima di contattare un'azienda professionale, che ci realizza la scheda e ci mette a disposizione tecnologia più evolute). Normalmente un'azienda che fa progettazione, non è la stessa che si fa il prodotto: soprattutto a livello di pre-assemblaggio si demanda ad aziende specializzate, che fanno solo questo. Ciò avviene per un problema di economicità, per mantenere i costi divisi a seconda delle divisioni aziendali.

Ma a chi ci rivolgiamo?

Sui PCB e sulla conseguente fase di assemblaggio la scelta dipende dalla prestazione a livello tecnologico che ci aspettiamo: numero di layer, qualità, resa (garanzia che l'oggetto poi rispetta le specifiche e viene associata alla disponibilità delle macchine di test da parte delle aziende produttrici).

A seconda dei livelli di prestazione richiesti abbiamo varie opzioni: normalmente in Italia, con medio tessuto industriale presente, ci sono aziende che possono arrivare allo "stato dell'arte" a 4 layer.

Altre aziende possono fare lavorazioni specifiche: multilayer fino a 32 e oltre, micro vie, assemblaggio con pad sotto il package. Questi possono essere dei valori discriminanti per scegliere un tecnologo piuttosto che un altro.

Ci sono delle aziende che studiano soluzioni di pcb interessanti dal punto di vista della dissipazione termica: infatti è sempre più forte la tendenza di usare il pcb, non solo come elemento di connessione e supporto meccanico, ma anche da dissipatore. Però ci sono grosse criticità legate allo spessore dei layer data la struttura planare: infatti lo spessore di un layer è 35 µm, quindi il calore da dissipare si muove in uno strato sottile. Essendo la conducibilità termica legata alla sezione attraverso cui avviene lo scambio termico si installano degli inserti metallici all'interno del pcb, o si adottano altre soluzioni simili.

Come ci si relaziona col fornitore di tecnologia?

Il fornitore di tecnologia ci dà una serie di regole, come nella micro elettronica: non ci dice come fa le cose, ma quali regole formali dobbiamo usare, in modo tale che il CAD che usiamo garantisca il rispetto di queste regole. Quindi il rispetto di queste regole garantisce entrambe le parti.

Ma noi cosa forniamo al fornitore di tecnologia?

Ci sono due alternative:

→ Siamo allineati con il fornitore con lo stesso CAD (Marca e versione) e passiamo tutto il database di progetto. Questa soluzione è valida solo se c'è una partnership forte tra azienda progettista e produttrice (Soci), altrimenti, se poi vediamo le schede nostre con un altro marchio perché abbiamo dato il database di progetto a qualcuno, poi non ci dobbiamo lamentare.

→ Forniamo l'output del CAD (disegno delle maschere), che mantiene solo le info necessarie per fare i pcb a chi li produce. Normalmente contiene le Maschere (passaggi di processo che richiedono litografia: conduttori, fotoresist, litografia) in un formato **.gerber**, che è uno standard ormai affermato nel mondo della realizzazione dei pcb, anche se, rispetto a come si lavora oggi è abbastanza obsoleto.

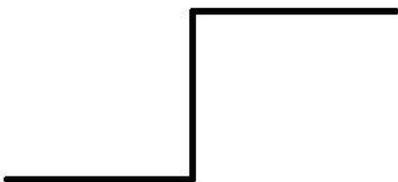
Lo standard Gerber si usava quando la produzione delle maschere veniva fatta attraverso foto plotter: è uno standard vettoriale, dove le geometrie sono descritte in termini di comandi per un foto plotter. Un foto plotter doveva garantire una risoluzione da 3ppi a 6000ppi (pensate che una buona stampa in bianco e nero è 600ppi) e aveva un laser che forava un fotoresist deposto su un foglio acetato. Perciò in questo file si trovano delle indicazioni del tipo:

“diametro apertura – coordinata_x – coordinata_y – percorsi del laser”

Oggi in realtà le stampanti che fanno le maschere sono raster, che non hanno più un comando vettoriale di questo tipo (ma lo standard è rimasto), quindi di solito la stampante ha una sua fase di processing, quindi questa fase è trasparente all'utente.

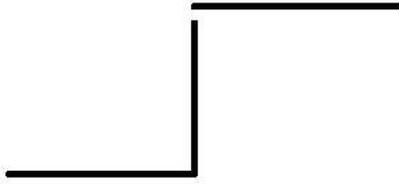
Noi, quindi, normalmente invieremo il file .gerber con un database molto accurato e notate che bisogna sempre fare attenzione all'accuratezza del database: tutti i sistemi di stampa, nel muovere l'elemento di stampa, hanno bisogno di coordinate (in virgola fissa).

La dimensione minima, che corrisponde ad un bit del numero, rappresenta la risoluzione della macchina. Quindi la questione è delicata perché: il database di un CAD (tipo Kicad) ha una sua risoluzione, produciamo un file d'uscita e queste informazioni andranno ad una macchina, che ha un suo modo di rappresentare i numeri in virgola fissa, con una sua risoluzione, visto che fra una virgola fissa e l'altra ci può essere uno step di arrotondamento. Soprattutto quando i CAD non erano perfezionati come oggi potevano succedere errori come questo:



se si doveva definire una pista formata da 3 lati così disposti si definivano dei rettangoli attraverso il loro centro e la diagonale. Chiaramente se questi punti nel passaggio da CAD a stampante vengono arrotondati e ci viene uno spazio tra un rettangolo e un altro, la pista viene interrotta.

In questa figura è evidente l'interruzione



Questo è chiaramente un effetto legato al processing non voluto dal sistema, ma è un tipo di comportamento possibile (adesso non succedono, però è bene sapere queste cose). Comunque per processi avanzati è bene fare delle verifiche sul nostro produttore.

Quindi di solito, oltre al file .gerber noi dobbiamo fornire un'altra cosa: i comandi che gestiscono il trapano e la fresa. Infatti la maggior parte dei processi prevede comunque una foratura meccanica e quindi i fori vanno definiti con un formato standard che è **exelon**. È uno standard semplice, si tratta di file leggibili, che si possono aprire e viene definito in questo file il diametro della punta e l'elenco delle coordinate. Anche qui c'è un problema di risoluzione: le risoluzioni tipiche di queste macchine sono dell'ordine del μm , con accuratezza dell'ordine dei $10 \mu\text{m}$.

In termini di algoritmi di foratura e di fresa è importante come sono ordinate le coordinate: è evidente che il tempo di lavorazione dipende fortemente da come sono state ordinate le fasi di realizzazione. Innanzitutto se lavoriamo con una fresa a singola testa è necessario raggruppare tutte le lavorazioni di uno stesso utensile, in modo da non dover inserire più volte lo stesso attrezzo. Normalmente, a livello industriale, le macchine sono multi testa, quindi si ha la disponibilità di più frese diverse, che possono essere sostituite in fase di lavorazione.

Su questa base si gioca il tempo che serve per fare la foratura: pensate che in media si fanno 100 o 1000 fori per scheda, quindi si riducono i costi di molto anche con un risparmio del 10% sul tempo di foratura.

Ma qual è il ruolo di noi progettisti in questa fase?

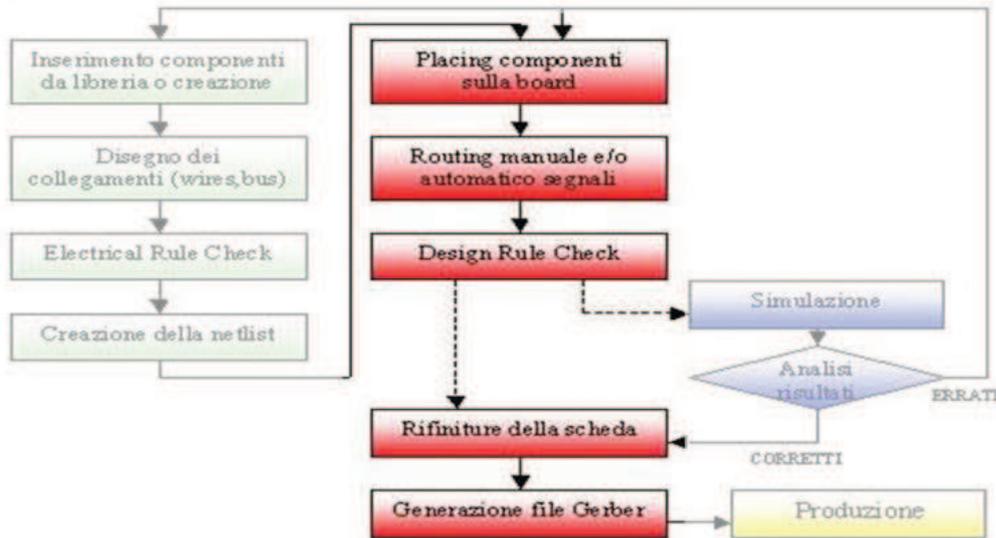
Nessuno: facciamo il file con il CAD e lo spediamo. Nel momento in cui si passa in fase industriale oppure ci si occupa del back-end (ingegnerizzazione del processo), l'ottimizzazione di questi tempi, può essere significativa.

REALIZZAZIONE HOME-MADE PCB

Per la realizzazione di un PCB hobbistica si stampa su un acetato il gerber positivo e poi attraverso il bromografo si effettua il passaggio litografico, comprando il PCB con il fotoresist già steso. Dopo l'esposizione agli UV si sviluppa il fotoresist in soda caustica (per eliminare il resist impressionato) e poi nel cloruro ferrico (o acido muriatico e acqua ossigenata) per rimuovere il rame non protetto dal resist. Il **punto critico** sta nella stampa del master: le stampanti a getto d'inchiostro o laser di oggi, non sono mai opache al 100% agli UV. Quindi con il bromografo occorre tenere i tempi minimi possibili per impressionare la parte non coperta, altrimenti l'imperfezione nella stampa può far sì che, anche dove sono le piste, si impressioni il resist.

Progetto Geometrico

Abbiamo da affrontare, rispetto allo schema iniziale, la parte selezionata del progetto:



I primi due blocchi sono quelli più significativi del progetto geometrico. Le fasi di **Place&Rout**, rappresentano la fase di sbroglio (in italiano). Ovviamente queste fasi non rappresentano un semplice esercizio topologico di posizionamento dei componenti sulla scheda e definizione delle piste previste dallo schema elettrico (che va fatto), ma contiene delle scelte progettuali, che determinano pesantemente la qualità del lavoro e le prestazioni elettriche stesse. Infatti l'ipotesi di connessioni elettriche ideali, che non alterano lo schema elettrico è un'ipotesi fasulla.

Quindi di solito queste fasi prevedono molte iterazioni: normalmente su queste fasi, sempre di più, acquistano terreno gli automatismi dei CAD e tradizionalmente lo sbroglio è un compito considerato da perito: quindi in un'azienda l'ingegnere fissa lo schema elettrico e dà delle linee guida allo sbrogliatore. Questo modo di vedere le cose è molto tradizionale, però nasconde alcuni aspetti che l'evoluzione della progettazione rende critici, per cui è bene che l'ingegnere abbia la possibilità di supervisionare questo processo, proprio perché in molti casi, il progetto geometrico è determinante, per la buona riuscita per sistema finale.

LAYOUT

Che differenza c'è tra layout e maschera? Il layout è una rappresentazione grafica collettiva associata allo schema elettrico, dove i componenti elettrici vengono rappresentati attraverso un loro identificativo e una forma fisica. Infatti in questa fase quello che ci interessa è:

→ **forma fisica del componente**

→ **footprint**: il modo con cui viene associato alle connessioni (di solito al suo interno è compreso l'ingombro)

Il layout normalmente è una vista dall'alto collettiva: non c'è un solo strato di connessioni, ma tutte se possibile. Se lavoriamo su singola faccia non abbiamo problemi, ma se stiamo lavorando con un multilayer, visualizzeremo le connessioni di tutti i layer (è un casino). Perciò il CAD permette di decidere la proprietà di visibilità o meno di ogni singolo layer. Si possono usare le trasparenze per mostrare contemporaneamente più layer e l'effetto relativo. I colori tradizionali sono verde e rosso per i layer estremi e poi per i layer intermedi altri colori personalizzabili.

Naturalmente oltre che, dei layer principali di connessione, abbiamo bisogno di layer aggiuntivi, in cui aggiungere altre informazioni per descrivere a pieno il supporto dei componenti, in modo tale da produrre tutti i file da spedire al tecnologo. Quindi è chiaro che, oltre alle connessioni, il file finale dovrà contenere anche informazioni dell'**outline** (contorno che la fresa dovrà tagliare), dei **fori di montaggio**; dovrà

contenere informazioni utili in fase di montaggio espresse mediante commenti o mechanical drawing; indicazioni su proprietà meccaniche, elettriche, il logo del produttore.

Oggi sempre di più, il CAD geometrico tende ad essere integrato con i CAD meccanici di produzione globale dell'oggetto elettronico fisico, perciò dovrà avere anche una descrizione 3D del sistema. Questo è un aspetto delicato, poiché normalmente un CAD elettronico è 2D (abbiamo un piano xy dove posizionare i componenti). Un tempo, se un progettista conosceva l'altezza dei componenti, era abbastanza tranquillo per la produzione. Se pensiamo ad un ultrabook e al suo spessore, si capisce bene che tenere presente le dimensioni relative dei componenti è importante per la produzione meccanica del case.

Notate: l'output 3D dei CAD elettronici sono compatibili con gli ambienti di progettazione meccanica 3D, dove viene progettato il case.

Sicuramente per potere disegnare e progettare il layout occorre sapere qual è il target tecnologico del nostro progetto: cioè se dobbiamo realizzare un pcb single layer, double o multi. Naturalmente il CAD, in funzione di questa scelta, ci dovrà mostrare quale struttura abbiamo considerato: ad esempio i layer verde e rosso rappresentano top e bottom per un pcb double; se scegliessimo di realizzare un pcb con 4 strati ci mostrerebbe 2 colori intermedi (oltre al verde e rosso di default) e così via.

OSS: nel caso in cui è previsto l'uso di ponticelli tra componenti è buona norma utilizzare il bottom layer, ed è buona norma orientare i ponti tutti nello stesso verso e della stessa lunghezza.

Questo aumenta la gestibilità del sistema in fase costruttiva, visto che i conduttori di rame (ponticelli) vengono sagomati da una macchina e poi posizionati sul pcb.

Quindi nel momento in cui si fa la scelta del print&etch con ponticelli, ci possiamo dare come obiettivo il minor numero di ponticelli possibile, tutti paralleli con lo stesso orientamento e possibilmente non di misure diverse (una o due misure).

In questo modo mantenendo i due layer si ha la garanzia che si può avere un progetto geometrico sempre collegato alla netlist. In alcuni casi il ponte si considera un componente (**0 ohm** non è un solo artificio, ma è un componente proprio fisico: esistono in tutte le serie di resistori l'elemento 0 ohm e di solito si usa nelle serie di due resistori → immaginate di aver previsto sul footprint due resistori in serie per raggiungere un particolare valore di R e poi in realtà esiste il resistore con quel valore di resistenza; per non modificare il footprint allora basta inserire un resistore di questo tipo).

I layer non sono tutti equivalenti, quindi in sede di progetto si fa una riflessione a priori, su quale funzione prioritaria associare ad ogni layer. Notate che teoricamente i layer sono strati di rame, quindi ci potrei fare che voglio, però quello che fa il progettista è scegliere per ogni componente una funzione prioritaria e attenersi poi a quella funzione associata.

Sicuramente i livelli **top e bottom** hanno come funzione principale quella di interfaccia per i componenti:

1) accoglieranno i footprint

2) ci si fisseranno i componenti

3) dissipazione termica (visto che sono il supporto dei componenti)

Ovviamente, se stessimo lavorando su un pcb double layer, top e bottom serviranno anche per fare le connessioni e gestire le alimentazioni (visto che non ci sono altri livelli a disposizione), ma in un multi layer hanno come funzionalità principali quelle sopracitate.

Tipicamente per applicazioni digitali ad alta velocità e complessità (tipo scheda madre), sopra e sotto ci sono dei piani privi di componenti che hanno una funzione di schermatura e stabilizzazione delle C parassite.

Gli **strati interni** hanno altre due funzioni principali:

1) tipicamente in un multilayer, coppie di layer adiacenti (che fa parte dello stesso double layer) vengono usate per trasmettere segnali e la connettività di questi.

Se lavorassimo su un 4 layer useremmo top-bottom per interfacciamento componenti e magari l'alimentazione, mentre gli strati interni per la trasmissione del segnale.

Su un 6 layer ci sarà una coppia di segnale e una per le alimentazioni. Quindi tipicamente si scindono queste due funzionalità e le alimentazioni vengono distribuite tramite elementi geometrici massicci (**piani di massa e piani di vcc**); ciò comporta una complessità in fase di progetto geometrico. Quindi normalmente quando si disegna, non si parte disegnando il piano direttamente, ma inizialmente si fanno le connessioni con tutte le piste, utilizzando la normale connettività usando delle piste diverse da quelle di segnale, poiché le piste di alimentazione, dovendo trasportare correnti tipicamente superiori rispetto a quelle che scorrono nelle piste di segnale, avranno una larghezza di pista maggiore. Garantita la connettività di tutti i pin d'alimentazione, tutti i CAD hanno dei tool che permettono di generare a partire da un .net a nostra scelta, un piano equipotenziale a un nodo. Quindi noi definiamo una regione sul pcb e poi demandiamo al CAD il compito di realizzare un piano equipotenziale ad un nodo che scegliamo noi. Il CAD cercherà di riempire tutti gli spazi disponibili con delle piste attaccate a questo nodo, non andando in corto con le altre cose che ci sono.

La cosa importante dei tool di generazione dei piani di massa è questa abilità di riempire tutto lo spazio disponibile, salvaguardando la regola di layout che prevede la distanza minima dagli altri conduttori.

Che vantaggio c'è nell'aver dei piani di massa e Vcc?

Un conduttore si accoppia capacitivamente e induttivamente con i conduttori dello spazio circostante. Quest'accoppiamento, in presenza di campi elettrici che variano rapidamente, è sede di passaggi di corrente che creano disturbi. La presenza di piani di massa sicuramente crea un **effetto schermante**: impedisce che le variazioni di campo elettrico si manifestino sulle piste al di sotto di esso.

NOTA: Rispetto alle piste di segnale la presenza dei piani di massa AUMENTA LE C PARASSITE. I piani di massa non riducono le C parassite, ma ne riducono l'effetto, cioè: le C parassite, che normalmente sono prodotte dall'accoppiamento tra piste circostanti, vengono dominate dalla capacità tra la pista e un piano, di valore maggiore, ma stabile nel tempo, quindi viene ridotto l'effetto di imprevedibilità dei comportamenti circuitali.

Quindi sarà una regola aurea in fase di progettazione quella di distribuire l'alimentazione tramite piani.

Quando siamo avanti al CAD, ci si ritrova avanti all'insieme dei footprint dei componenti, li disponiamo attraverso il tool e il primo obiettivo è quello di garantire la connettività dei vari componenti con i vari layer di connessione.

Oltre ai layer conduttori, di segnale e alimentazione, ci sono altri layer importanti: non sempre verranno realizzati tutti, ma occorre capire come sono generati.

Due layer che si trovano quasi sempre sono:

- 1) **Solder Resist**
- 2) **Serigrafia (silk screen)**

Solder resist definisce una copertura polimerica di protezione (sopra e sotto) delle zone che non devono essere sede di saldatura. Normalmente era indispensabile per la saldatura automatica a onda TH, ma è utile per la saldatura manuale e a riflusso per evitare i cortocircuiti.

Aiuta in due modi:

- 1) impedire la bagnabilità della lega di saldatura rende più facile deporre la lega di saldatura
- 2) per ottenere un buon giunto di brasatura occorre che tutti e due gli elementi di saldatura devono avere la stessa temperatura. Ma cosa succede di solito? Il piedino con la sua C termica si riscalda subito, la pista invece dipende a seconda delle dimensioni. Quindi la copertura offerta dal solder resist, aumentando leggermente la R termica di scambio dalla pista all'ambiente, fa in modo che la T di fusione della lega venga raggiunta prima. Perciò il solder resist è uno strato importante che viene generato automaticamente

Il CAD genera automaticamente il solder resist.

NOTA: ci preoccuperemo del livello di solder resist solo se vorremo scoprire delle zone: ci sono dei casi (ad esempio quando si usa il pcb come dissipatore) dove occorre lasciare delle aree di rame scoperte.

Il secondo layer ausiliario è il silk screen: sulla serigrafia di solito si lascia di quello che è presente sullo schema, solo l'ID di un componente (poi se c'è spazio anche il valore e l'outline).

Perché è utile?

Ha due funzioni informative:

1)logistica→serial number, logo, ecc.

2)di struttura→jumper e collegamenti particolari

Inoltre è utile sia in sede di verifica dell'assemblaggio che sede di riparazione e debug dei componenti.

Nelle fasi di test, per ispezione visiva ad esempio, un componente montato a rovescio si vede subito, senza stampare il piano di progetto per vedere ad esempio se un diodo è messo al contrario o situazioni simili.

Abbiamo visto che è possibile creare nuovi **footprint**, ovvero l'interfaccia verso la scheda per la connettività elettrica ed anche meccanica: è importante considerare le dimensioni e il peso del componente. La maggior parte dei componenti elettronici integrati passivi hanno una massa che, in una vita normale con vibrazioni accettabili, permettono l'uso delle saldature anche per finalità meccanica: la saldatura garantisce contatto elettrico e meccanico (supporto per il componente). Non è sempre così: se dei componenti hanno un peso elevato o l'applicazione prevede delle oscillazioni sopra un certo valore, dobbiamo preoccuparci di questo aspetto. In questo caso occorre prevedere anche degli ausili di montaggio meccanico ulteriori.

OSS: Questo è tipico e quasi sempre vero per i connettori. Oltre alle connessioni elettriche, hanno altre connessioni che garantiscono la robustezza meccanica.

Il mondo del montaggio elettronico in termini di metrica è abbastanza confuso: le misure vengono definite in pollici e unità imperiale.

Noi ci troveremo di fronte ai data sheet, che le riportano tutte e due e i CAD, che ci fanno scegliere fra griglia metrica o imperiale. Questo è un problema, poiché troveremo sempre dei componenti che seguono meglio la notazione che non abbiamo adottato per la disposizione sul pcb, quindi si adattano male.

Quindi quando lavoreremo col CAD, cercheremo di avere inizialmente una griglia larga in modo che siano discretizzati con meno libertà i componenti e sia più facile il loro piazzamento e la stesura delle piste, salvo poi utilizzare una griglia più fine per dei passaggi di rifinitura. Con una griglia di 1mm è più facile piazzare i componenti, perciò in quest'ottica, avere un componente che ha un passo di 2,54mm è una rottura in fase di place.

In pratica cerca di arrangiarsi, però teoricamente è più conveniente usare il sistema internazionale per un ovvio motivo: mentre nel SI è possibile rappresentare esattamente su un fixed point i 2,54mm, non è vero il contrario.

Pragmaticamente uno vede i componenti che ha scelto, vede il passo che si ritrova e poi la maggioranza vince.

La scelta del lato di montaggio: i lati di montaggio possono essere due.

Nel TH è meno probabile il posizionamento di componenti su due lati, poiché la saldatura sia a onda che pozzetto non può essere eseguita se c'è già montato un componente da quel lato. Invece la saldatura a riflusso o infrarosso si può fare con i componenti SMT sia da un lato che dall'altro. Normalmente, nel caso in cui si monta su tutti e due i lati, si sceglie sempre un layer per i componenti più grandi e pesanti e uno per quelli più piccoli e leggeri.

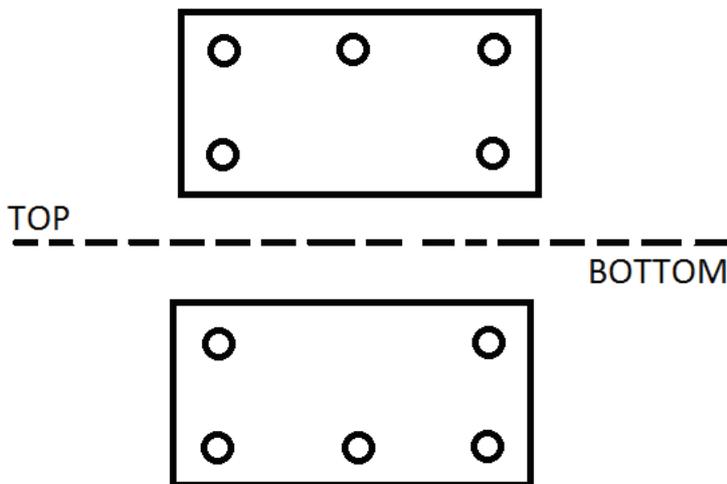
Qual è il vantaggio?

Un componente pesante, se la scheda raggiunge la T di fusione quando questo è a testa in giù, la forza di gravità tende a staccarlo. In alcuni casi si cerca di usare delle leghe di saldatura a temperature diverse, con dei profili di temperatura differenziali.

Dal punto di vista del CAD verificate sempre la corretta gestione del montaggio sul lato inferiore.

Normalmente il CAD vede la scheda dall'alto e il footprint è pensato per essere collocato sul piano

superiore, quindi se pensiamo di montare un componente sull'altro lato, rispetto a quello per cui è stato progettato il footprint, poi non ci sarà corrispondenza tra i piedini e i collegamenti elettrici, poiché il tutto è specchiato.



È fondamentale, quindi, dire al CAD qual è il lato di montaggio del sistema.

Notate che questa cosa trae in inganno specialmente per i componenti TH: se il componente ha una simmetria, immaginate un resistore con footprint a due fori, la vista TOP-BOTTOM è la stessa.

Anche kicad, come gli altri CAD automaticamente specchia il footprint dei componenti che vanno sul lato inferiore, quindi tutti i pin number sono coerenti. Ovviamente va verificata questa cosa ed è un errore abbastanza comune della fase del progetto geometrico.

Continuando sempre con il montaggio su più facce, ci possono essere dei vincoli sui fori passanti (TH), elettrici e termici, al di là della connettività.

Sulla serigrafia ci si mette spesso l'outline e le info che ci si aspetta sono:

-un'identificazione elettrica del componente (sapere che quel resistore è R12 ad esempio, ci dice tutto poiché attraverso la mappa dei componenti riesco a districarmi nello schema elettrico)

Notate che con kicad si possono mettere numeri e lettere sulle coordinate estreme del foglio dove viene stampato lo schema. Se si attiva questo schema, nella BOM poi ci saranno le coordinate dei componenti come sulle cartine geografiche.

Questo è utile ad esempio per vedere la polarizzazione di C e Diodi, capire come montarli e verificare se sono posizionati in maniera corretta.

Per i circuiti integrati ci si aspetta l'info relative ai piedini e alla forma delle piste e del footprint.

Ad esempio i package dual in line avevano il pin 1 disegnato diversamente rispetto agli altri pin (era quadrato e gli altri tondi), per capire subito visivamente sul footprint dove era posizionato.

Nota: l'unico vincolo relativo alla serigrafia è che non ci vengano scritte sui pad. Spesso nei moduli di kicad chi li ha fatti non c'ha fatto attenzione a questa cosa, quindi ci sta che si manifesti questo problema, che è abbastanza grave. Infatti grattare con una lametta su un pad di dimensioni 0.1 mm per rimuovere la serigrafia è un'operazione delicata e d'altra parte, se non rimuoviamo la serigrafia non riusciamo ad effettuare la saldatura.

Di solito il fornitore di tecnologia sa che è possibile che avvenga questo problema, quindi ha uno strumento automatico di post processing per cui sul pad si perde l'informazione della serigrafia.

Suggerimento: NON affidatevi a questo tool del tecnologo, poiché non tutti ce l'hanno e inoltre è inutile fare una serigrafia che verrà tolta.

PLACEMENT

Dopo le riflessioni sugli elementi del progetto geometrico vediamo le prossime fasi: abbiamo visto che nel momento in cui associamo al progetto geometrico la netlist dello schematico, il pcbnew sa quali sono i componenti dello schema. Di solito pcbnew mette tutti i component attaccati uno sull'altro. La fase di piazzamento prevede da parte nostra la definizione del bordo della scheda come prima cosa e non è detto che tutta l'area disponibile sia ammessa. Inoltre la nostra scheda avrà delle geometrie di montaggio, fori e vincoli, che in sede produttiva non sono variabili indipendenti.

Notate che in sede produttiva la forma del pcb, ad esempio, non è aleatoria, ma è già stata progettata. Occorre fare entrare tutto in quella forma definita dall'architetto del progetto.

Quindi una volta definita l'area utile, il CAD può lavorare insieme a noi per collocare i chip in area utile. Normalmente si può scegliere se posizionare i componenti sopra e/o sotto, su una griglia grossolana, la rotazione dei componenti.

OSS: sempre di più, in progetti sofisticati, si può aggiungere a quest'approccio di vincoli 2D, dei vincoli selettivi per ogni componenti.

Perché può essere interessante?

A causa dell'altezza: tenetelo presente perché a seconda di dove andremo a lavorare, potremmo essere stesso noi a proporre di acquistare un CAD con queste caratteristiche.

Anche per il montaggio manuale ci sono dei vincoli: notate che il montaggio manuale non si è estinto. Al di là di questo se poi il nostro progetto ha una prospettiva di montaggio manuale ha delle ripercussioni sulle scelte costruttive e sulla fase di place and routing.

Perché?

Perché è dimostrato statisticamente che tipicamente il tasso di errore di un montatore manuale aumenta significativamente in presenza di orientamento dei componenti casuale, rispetto ad un orientamento ordinato. Ad esempio mettere l'anodo dei diodi sempre verso l'alto, il pin 1 dei circuiti integrati sempre nella stessa posizione, facilita il montaggio manuale e riduce l'errore da parte dell'utente in maniera significativa.

RATSNEST

Appena si fa il piazzamento dei componenti, il CAD ci mostra tutti i componenti con dei fili bianchi che indicano la connettività.

Cos'è e a cosa serve?

I fili sono segmenti elastici immateriali, non hanno larghezza, non interagiscono con gli altri moduli, si possono estendere e intrecciare. Servono per capire come andrà ruotato un componente in fase di placement. In pratica dà info complementari al routing. Oltre che per aiutare il progettista a comprendere le cose, inoltre forniscono uno strumento utile per il CAD per le fasi di piazzamento e rotazione. La conoscenza della ratsnest permette di calcolare delle metriche: se prendiamo i fili e ne sommiamo integralmente le lunghezze, otteniamo una metrica che ci dice quanti metri di filo serviranno con quella configurazione particolare.

E quindi se confronto due soluzioni di piazzamento quella con la lunghezza di ratsnest minore sarà più facile da collocare. Non solo, se prendo dei componenti e li divido in due o più gruppi racchiusi da un cerchio (immaginario), questo cerchio taglierà un certo numero di connessioni. La quantità di fili che tagliamo ci dà una metrica di quanto quel gruppo è interconnesso con gli altri gruppi. Ciò serve per capire se stiamo partizionando bene il sistema o meno.

NO ILLUSIONI: fare i progetti e lavorare con kicad vuol dire lavorare molto a mano. I button per rendere tutto bello non ci sono e i CAD che ce l'hanno, li fanno pagare tanto.

Quindi quale strategia adottiamo?

Partizioniamo il progetto: l'ingegnere che ha progettato il sistema suddivide il lavoro per gruppi di pezzi di scheda omogenei: pensate all'ECG, che è costituito da parte applicata, AD210, NOTCH e Alimentazione. Se riportiamo questa partizione sul progetto geometrico potremo affrontare il placement di ogni sezione separatamente, non ci sarà grande intreccio dei fili.

Quindi uno fa questo:

-Partiziona il progetto

-Colloca tutti gli elementi partendo da quelli vincolati (pensando all'ECG, i BNC sono vincolati, come quasi in tutti i progetti i connettori sono vincolati, basti pensare a un connettore di un cellulare che non può essere posto a caso, ma in un punto ragionevole dettato dalle specifiche di progetto)

OSS: è possibile vincolare dei componenti attraverso tool di placement automatico

-Colloca gli elementi non vincolati

ROUTING

A questo punto uno ha tutti i componenti piazzati e si inizia il lavoro di routing: ci sono diverse strategie a seconda del numero di componenti e a seconda delle criticità del progetto, si può scegliere se piazzare prima segnali o alimentazioni.

NOTA: si posizionano prima le cose critiche: segnali ad alta frequenza (che necessitano connessioni corte), segnali sensibili al disturbo o sensibili agli ingressi.

Se il segnale non è critico, magari parto dall'alimentazione che ha più nodi da mettere assieme e soffre di più il problema delle vie: se facciamo 5 vie per portare un'alimentazione, la R della via abbassa la tensione di alimentazione nel punto di destinazione e può avere ripercussioni sul funzionamento del sistema.

Quindi adesso iniziamo a disegnare le piste ricoprendo i fili della ratsnest.

Per disegnare le piste noi sappiamo da dove partono e dove devono arrivare, quindi possiamo scegliere un percorso in due modi diversi:

1)il più corto

2)attraverso più layer.

Che vantaggio ci può essere se ho un percorso dritto o attraverso vie?

Se si vedono i pcb industriali spesso vengono utilizzate delle vie verticali facendo due tratti orizzontali su un layer e uno su un altro layer.



Queste sono strategie globali di routing, che in alcuni casi possono dare dei vantaggi, soprattutto quando si inizia il lavoro e non si conosce la complessità globale del progetto: adottare, infatti, un verso privilegiato per tutte le piste di un layer riduce il numero d'incroci. È una cosa tipica nel dual layer trovare tutte le piste di sopra orizzontali e sotto verticali, se non ci sono criticità elettriche di progetto.

Di solito i router automatici adottano soluzioni automatiche di questo tipo, salvo per le situazioni dove una disposizione a doppia via non porta ad alcun vantaggio.

Ma che dimensioni deve avere la pista?

La cosa fondamentale da capire sono i criteri di scelta delle piste: Kicad permette di editare singolarmente pista per pista e poi segmento per segmento di ogni pista (track e segment), ma di default ci permette di definire alcune lunghezze standard per le piste. Possiamo associare ad ogni net (insieme di punti equipotenziali), una dimensione standard.

Con che criterio si scelgono le dimensioni delle piste?

Ci sono 3 criteri di scelta:

1)**legato alla tecnologia produttiva:** al fatto che la tecnologia prevederà un minimo, non assoluto, ma che fa parte di una caratterizzazione stocastica del processo, cioè il produttore osserva la risoluzione tipica che riesce ad ottenere col suo processo. Di solito le misure che si riescono a fare hanno una distribuzione gaussiana, quindi ci sarà un σ della distribuzione del valore che riesco ad ottenere. Tipicamente si usa il **Criterio del 6σ** : se propongo come indicazione dei valori che sono dell'ordine di 6σ , la probabilità che, in seguito ad un errore di processo, due piste formino un cortocircuito si riduce fino a valori trascurabili.

Nella pratica vuol dire che se uso regolarmente, per tutte le piste che devo fare, la larghezza minima data dal costruttore, poi avrò una certa probabilità che una delle piste sia interrotta o altre in cortocircuito; se aumento le dimensioni, questa probabilità diminuirà. Quindi ci sono 2 aspetti contrastanti : io vorrei fare tutto il più piccolo possibile, ma ci sarà una riduzione della resa. Se riesco mantenendo la specifica del progetto ad usare un decimo o due di millimetro in più, aumenterà la resa. Quindi useremo le dimensioni minime solo nel momento in cui è pagante in termini di resa. In pratica, se c'è lo spazio sul pcb aumento le dimensioni delle piste, altrimenti uso quelle minime e rischio.

NOTA: anche nel progetto, scegliere sempre le dimensioni minime e non preoccuparsi delle dimensioni NON E' UNA BUONA SCELTA!

Il primo aspetto è relativo a segnali non critici e generali, ma gli altri 2 aspetti da tenere presenti per la realizzazione delle piste sono:

2)**quanta corrente passa nella pista** : Valore massimo e efficace. Entrambi questi parametri mi porteranno a rinunciare alla dimensione minima e ad avere una dimensione maggiore, poiché la densità di corrente max che la pista può smaltire è limitata e dipende dallo spessore, nonostante il rame sia un buon conduttore. Infatti il rame è sede di produzione di calore per effetto Joule, quindi si può valutare la sovratemperatura, rispetto alla temperatura ambiente, a cui arriverà la pista e se si arriva a certi valori, la pista tenderà a scollarsi dal supporto di vetronite con conseguente diminuzione della Capacità di smaltire il calore verso l'ambiente esterno e a lungo andare la pista fonde (diventa un fusibile).

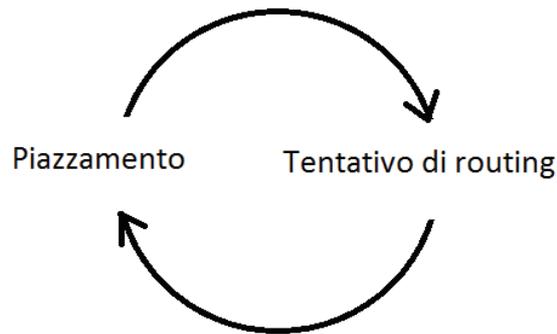
3)**considerazione elettrica:** minore spessore della pista vuol dire maggiore R parassita. Quindi a seconda dell'applicazione può dare più o meno fastidio questo effetto. Con applicazioni ad alta frequenza o con fronti digitali con tempi di salita rapidi, la forma geometrica delle piste è legata alla modalità con cui il segnale si propaga sulla pista, perciò occorrerà tenere conto della C e L parassita e le piste avranno delle forme ben precise. Se vediamo com'è montato il modulo wi-fi nel pc ci accorgeremo che le connessioni non sono fatte a caso, ma con geometrie ben precise (curve non angoli retti) dovuto al fatto che le piste diventano linee di trasmissione per i segnali elettromagnetici.

Naturalmente in fase di routing avremo vincoli topologici, che potremo superare in caso di multilayer con l'uso di vie oppure con dei bridge.

Normalmente le vie non possono che essere vie di connessione tra due layer adiacenti, oppure vie globali (nei multilayer).

Manualmente è gioco forza fare separatamente le due operazioni: piazzamento e routing (tirare le piste). Il CAD ci dà dei tool decorosi per editare le piste, aggiungere snodi, segmenti, drag delle piste mantenendo caratteristiche base. Inoltre i CAD prevedono delle **strategie di place and rout automatico**: in questo caso le due fasi vengono intrecciate, poiché non sono indipendenti.

Esiste tutto un mondo di algoritmi di diversa complessità che possono essere usati per ausilio del progettista in questo compito. Non ne vediamo i dettagli matematici, ma diamo delle idee: la cosa più semplice da immaginare è una impostazione sequenziale del processo, ovvero



Per ridurre la difficoltà di piazzamento si inizia con il ridurre la dimensione di griglia, infatti sul piazzamento di prima approssimazione non mi serve posizionare i componenti nella posizione precisa (dove poi saranno posti effettivamente) per capire se il routing sarà complesso o meno. Kicad ha uno strumento di piazzamento oneroso dal punto di vista computazionale, ma abbastanza ingegnoso: prende i componenti, prova le varie permutazioni sulla griglia grossolana di prima approssimazione e poi fa una stima della metrica tramite ratsnest e itera fino a trovare la collocazione dei componenti che portava al minimo numero di lunghezza media di piste.

Poi c'è l'algoritmo **mincut**: prova a fare un partizionamento nei vari modi possibili in cui si possono creare due gruppi di componenti e esamina il numero di percorsi conduttori tagliati dalla separazione in due gruppi, di conseguenza cerca di partizionare il progetto in modo da ridurre al minimo i tagli.

Una volta trovata una metrica per stabilire se un piazzamento è buono o cattivo, uno degli algoritmi che ha spopolato negli ultimi 20 anni è il **Simulated Annealing**. L'annealing è un processo che si esegue in meccanica: tutte le volte che un sistema è stato sottoposto a stress (è sede di forze), si sottopone ad un ciclo a temperatura medio alta per un tempo abbastanza lungo, in modo tale che le tensioni interne del materiale portino, rilassando i vincoli di coesione, il sistema ad una condizione di equilibrio superiore. Notate che ratsnest vuol dire elastico in italiano, quindi se il componente lo immaginate libero di muoversi ci sarà una forza esercitata dalla ratsnest e ci sarà una condizione per cui i fili saranno meno tesi. Quindi il simulated annealing associa a questo il fatto che partendo da una collocazione possibile, non si limita a considerare le configurazioni vicine e adottare la migliore, ma adotta un criterio statistico di scelta, che può accettare di passare attraverso stati intermedi peggiori.

Perché ?

Perché il problema di place and routing ha dei minimi locali, nel senso che partendo da un piazzamento base, se non voglio rimettere in discussione alcune scelte prese, poi arriverò ad una condizione oltre cui non posso andare, che è un minimo locale; poi però, se supponessi di volere modificare una scelta che ritenevo un vincolo imm modificabile (es. spostato un componente), allora potrò arrivare ad una nuova condizione, che sarà un minimo locale diverso dal precedente e magari migliore. Quindi l'idea del simulated annealing è che l'effetto della temperatura può dare abbastanza energia ad un componente, tale da abbandonare la zona dove era stato collocato. Questa è una visione molto banale dell'algoritmo, ma che vuole rendere giusto il concetto e le basi su cui poi potere approfondire se si vuole attraverso ricerche.

In un approccio sequenziale, dopo aver fatto il piazzamento, quali sono gli algoritmi di routing?

Gli algoritmi più rozzi partono da una traccia alla volta in maniera sequenziale. Sul disegno della singola traccia esistono ulteriori algoritmi, che mi permettono di trovare un percorso da A a B, ammesso che esista: sono i classici algoritmi da labirinto. Però il problema degli algoritmi che lavorano sul singola traccia sono influenzati dall'ordine con cui tracciamo le piste.

Di solito gli algoritmi migliori, affrontano il problema del routing in modo collettivo mettendo in esame tutte le tracce contemporaneamente, come avviene nel mondo della progettazione microelettronica.

Ma in che modo? Sul Pcb noi abbiamo delle regioni occupate dal dispositivo (dov'è il footprint) e regioni, di forma più o meno regolare (riconducibili a rettangoli), a disposizione per tirare le piste. Possiamo immaginare che le regioni di pcb utili al tracciamento delle piste siano schematizzate con dei rettangoli ai cui bordi sono presenti i segnali da connettere e quindi poi si realizza un algoritmo che specifica quale segnale deve essere collegato a quale. In questo modo si affronta globalmente il problema del routing. Naturalmente se ho un'area più complessa da dedicare al routing la posso spezzettare in più sottoaree e utilizzare lo stesso approccio.

OSS: anche gli algoritmi migliori, difficilmente terminano il progetto automaticamente.

L'approccio tipico è quello di fare un primo piazzamento da progettista, partizionando sulla base di conoscenze a priori che il CAD non può sapere (ed esempio la suddivisione delle sezioni dell'ECG); dopo c'è un ulteriore passaggio di sezionamento in zone di placement; poi c'è un primo routing automatico e poi si sistemano le piste che non sono state collegate.

BACK END

Le fasi finali di progetto si chiamano back-end del lavoro e vengono eseguite le operazioni di rifinitura: si controlla che le piste e i footprint abbiano le dimensioni giuste, che nel montaggio i componenti più alti non facciano da ostacolo al montaggio dei componenti più bassi e viceversa (pensate alla testa che piazza i componenti percorrendo traiettorie, che potrebbero essere ostacolate dai componenti più alti). Ci sono dei CAD appositi che simulano tutti il processo di montaggio ed eventualmente danno dei warning.

Nei Pcb TH, una cosa interessante è che un elemento di criticità meccanica della scheda sono lunghe fila di buchi, poiché rendono la scheda fragile. Quindi normalmente se tanti package TH creano sul pcb un percorso di buchi che potrebbe infragilire la scheda, vengono sfalsati per aumentare la rigidità della scheda.

VERIFICA DELLE REGOLE DI LAYOUT

Questo è un passaggio fondamentale: ci accorgeremo che il CAD ci impedisce di fare cose non coerenti con lo schema elettrico (cortocircuiti, compenetrazione di componenti, ecc). Questo tool è utile e real-time, si può disattivare se per arrivare al progetto completo c'è una fase intermedio di violazione. È molto utile perché ci guida verso un progetto finale che rispetta le regole geometriche: queste regole sono di tipo geometrico, non elettrico.

È sufficiente questo?

Tipicamente no, salvo impegno contrario del caddista. Il DRC online è parziale, che ci guida durante le varie fasi, ma tenete presente che riguarda un'area locale intorno al cursore. Quindi non è un controllo esaustivo di tutte le regole che il tecnologo ha previsto.

Per fare una verifica esaustiva delle regole si utilizza un software in batch, che viene lanciato al termine del progetto. Se si ottiene l'OK, si possono generare i file da sottoporre all'azienda.

OSS: se ci accordiamo con un produttore sull'uso di CAD, o se chiediamo al produttore stesso la verifica delle regole di layout, questo ha un impatto di tipo economico: se il DRC lo fa il tecnologo avremo sicuramente una resa del 100% ed il costo degli scarti (le piste non buone) se li assume chi le ha prodotte. Mentre se il DRC lo facciamo noi e poi qualche scheda non è corretta, gli scarti li paghiamo noi.

A questo punto l'ultima preoccupazione per noi è quella di generare i file da spedire:

- Master (.gerber)
- Solder resist (è automaticamente generato)
- Solder paste (opzionale, va scelta)
- Maschere per le serigrafie
- File per fori e fresature

RICHIAMO AL COMPLETAMENTO DEI TEMI RELATIVI ALLA PROGETTAZIONE GEOMETRICA

Ci sono tre aspetti su cui dovremo poter dire qualcosa:

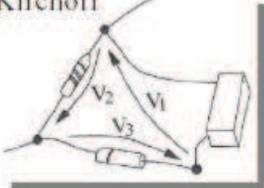
- 1) **Parametro elettrico della pista:** importanza dei parametri parassiti che introduciamo per fare una corretta valutazione del sistema, compatibilità elettromagnetica tra componenti non ideali
- 2) **Segnali ad alta frequenza:** che viaggiano a frequenze tali per cui non si può considerare concentrato il parametro parassita della pista su cui transita. La condizione in cui occorrerà tenere conto di questo fenomeno dipende dalla misura massima e minima della lunghezza delle piste: quando le piste, rispetto alle caratteristiche del segnale, sono più lunghe di una certa quantità, non si potrà schematizzare una pista come una R con C e L parassite, ma come un oggetto a parametri distribuiti, dove R,L e C sono associati alla lunghezza della pista. Quando occorre gestire questi segnali particolari occorrerà fare le piste con una geometria ben precisa per garantire l'integrità della forma del segnale che sta transitando.
- 3) **Potenza Termica:** dissipazione del calore per mantenere la pista ad una certa temperatura durante il suo funzionamento, in modo tale da non permettere al calore prodotto per effetto Joule di surriscaldare la pista a valori tali da compromettere la sua adesione al substrato.

Una volta pensato e realizzato il circuito di solito usiamo **Kirchhoff** (la grande verità dell'elettronico)

Validità delle Leggi di Kirchhoff

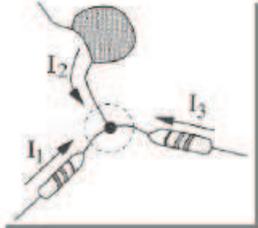
KVL $\sum_{k=1}^N V_{k,k-1} = 0$

Con nessuna maglia del circuito debbono concatenarsi flussi magnetici variabili di entità apprezzabile.



KCL $\sum_{m=1}^L I_m = 0$

I morsetti ed i conduttori di collegamento sono sede di cariche elettriche trascurabili.



e ci dimentichiamo a volte le ipotesi a monte di questi teoremi: i principi di k funzionano nell'astrazione con cui disegniamo gli schemi elettrici, ovvero che non ci siano campi magnetici concatenati e capacità nei nodi.

Quindi lo schema elettrico funziona e si simula. Nella pratica però non è così: quando si fa un pcb le piste non sono ideali come i fili dello schema. I fili sono oggetti fisici con certe dimensioni che formano dei loop e quindi in generale non sarà vera la loro idealità e che quello che è sul pcb è la semplice replica dello schema (avrà una mutua induttanza e una mutua capacità). C'è di bello che nella maggior parte delle applicazioni a frequenze tranquille questi fenomeni sono trascurabili, però professionalmente dobbiamo sapere distinguere i casi in cui si possono trascurare questi effetti e quando no. Perciò adesso vedremo come valutare e stimare queste grandezze parassite, ma naturalmente qui siamo ancora in un ambito a parametri concentrati e non ci dobbiamo preoccupare del tempo di propagazione di un segnale elettrico e quindi comunque è ancora equipotenziale una pista sollecitata da un certo segnale.

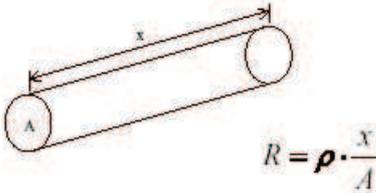
Poi dovremo trovare un modo convenzionale di attribuire R,L e C a un filo e un buon modo per modellare l'effetto è quello di applicare R,L e C parassite tramite l'approssimazione a T o pi greco.

Stima Resistenza filo

Una cosa tipica dell'ingegnere è sapere stimare l'ordine delle grandezze in gioco: il problema per la R è facile, serve la legge di ohm su geometria del conduttore e in continua, senza effetti particolari frequenziali, la R è legata a ρ .

Resistenza parassita

E' la normale resistenza elettrica associata al conduttore di collegamento:



Esempio

10 cm di filo di rame AWG30

$x = 0.1 \text{ m}$

$\rho = 0.017 \mu\Omega\text{m} \Rightarrow R = 25 \text{ m}\Omega$

La resistenza parassita dei collegamenti è spesso trascurabile.

American wire gauge data

AWG#	Diameter, cm	AWG#	Diameter, cm
0000	1.168	21	0.0785
000	1.040	22	0.0701
00	0.927	23	0.0632
0	0.825	24	0.0566
1	0.735	25	0.0505
2	0.654	26	0.0452
3	0.583	27	0.0409
4	0.519	28	0.0366
5	0.462	29	0.0330
6	0.411	30	0.0294
7	0.366	31	0.0267
8	0.326	32	0.0241
9	0.291	33	0.0216
10	0.267	34	0.0191
11	0.238	35	0.0170
12	0.213	36	0.0152
13	0.190	37	0.0140
14	0.171	38	0.0124
15	0.155	39	0.0109
16	0.137	40	0.0096
17	0.122	41	0.00863
18	0.109	42	0.00762
19	0.0948	43	0.00685
20	0.0874		

In questo caso si vede che 10cm di filo 30 AWG (American Wire Gauge) ha una R=25 mohm. (Sono 3 decimi di diametro, è circa 3 capelli)

OSSERVAZIONE UNITA' DI MISURA

Oltre a AWG spesso si trovano mils ed inches invece che mm e cm

E.g. 6 mils = 6×10^{-3} inches = 15.24×10^{-3} cm = 0.1524 mm

Tabella di Conversione	Pollici <i>inchs</i>	Centimetri <i>cm</i>	Millesimi di pollice <i>mils</i>	Millimetri <i>mm</i>
Pollici <i>inchs</i>		cm / 2.54	mils / 1000	mm / 25.4
Centimetri <i>cm</i>	inchs * 2.54		(mils / 1000) * 2.54	mm / 10
Millesimi di pollice <i>mils</i>	inchs / 1000	(cm / 2.54) / 1000		(mm / 25.4) / 1000
Millimetri <i>mm</i>	inchs * 25.4	cm * 10	(mils / 1000) * 25.4	

Trovando l'area del cerchio si trova una resistenza di 25 mohm. A noi con le piste le cui dimensioni sono di W 3 decimi e l 10 cm e spessore 40 micron si ha una R proporzionale a 0.1 ohm.

Tanto o poco?

Se i segnali in gioco sono lenti e le resistenze di feedback sono dell'ordine dei 10 Kohm va bene, ma in alcuni casi non va bene (ad esempio in serie ad un mosfet con R_{DS} da 1 mhm ci vuole una pista più corta altrimenti questa R della pista è troppo grande e attenua l'effetto del dispositivo). Ovviamente non si farà una pista di 3 cm per ridurre la R, ma si fa uno spessore quadruplo del rame. Questi conti occorre saperli fare perché capita spesso nei sistemi di dovere gestire le grandezze parassite.

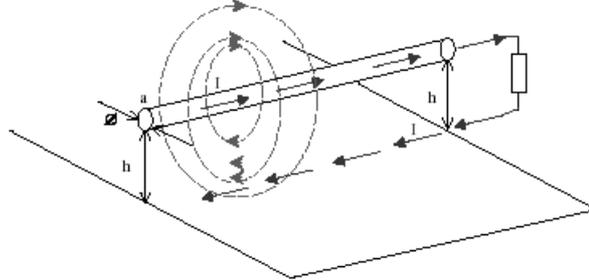
La AWG è una misura simile a quella che si usa per le armi. Indica la quantità di filo che viene utilizzata in una misura standard: più è grande il calibro e più è piccolo il filo. La R è facilmente calcolabile e si vede subito.

Stima Autoinduttanza filo

Un aspetto diverso ce l'ha l'induttanza: le piste avranno un'autoinduttanza parassita cioè un filo che porta un segnale variabile in frequenza, ci aspettiamo che sia sede di autoinduttanza, poiché per la legge di Biot-Savart si genera un campo magnetico che si concatena col conduttore stesso.

Induttanza parassita

Percorso della corrente?



Esempio

X = 10 cm di filo AWG30 parallelo al piano di massa, h=5 mm .

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \cdot x \cdot \ln \frac{4h}{\phi} [H] \quad (x \text{ in } [m])$$

⇒ L = 84.4 nH @ 10MHz ⇒ 5.3 Ω ⇒ può diventare significativa.

Qui c'è il conto banale dell'autoinduttanza di un filo sul piano di massa e si può considerare come un filo uguale a distanza doppia. Nell'ipotesi semplificativa che la corrente all'interno del filo si distribuisca omogeneamente all'interno del conduttore, viene fuori la formula

$$l_e = \frac{\psi_e}{I} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{s^2}{r_{w1} r_{w2}} \right) \quad \left[\frac{H}{m} \right]$$

Se poi $r_{w1} = r_{w2} = r_w$ allora $l_e = \frac{\mu_0}{\pi} \ln \left(\frac{s}{r_w} \right)$.

Il risultato che viene fuori è 85nH in questo sistema, **tipicamente le piste pesano decine di nH**. In questo caso la pista ha un'induttanza minore poiché tipicamente h=1,6mm rispetto ai 5mm dell'esempio.

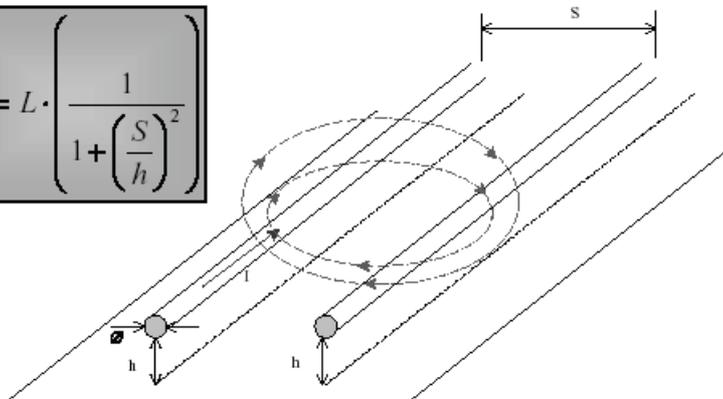
È tanto o poco?

Questa è un'impedenza che dipende dalla frequenza e va visto a che frequenza siamo: va valutato.

Probabilmente anche qui la maggior parte delle situazioni non sarà così critica. In questa situazione, 85nH valutati a 10 Mhz non daranno problemi.

Stima Mutua Induttanza filo

$$L_M = L \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{S}{h} \right)^2}$$



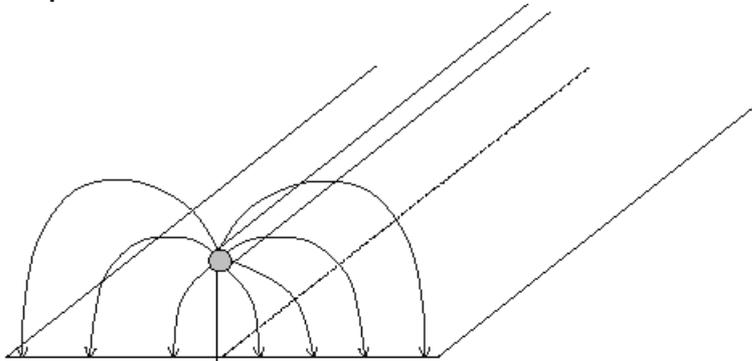
Essendo L l'induttanza propria associata a ciascun filo

Sicuramente se l'auto induttanza può provocare qualche difformità fra progetto teorico e reale, sicuramente è molto più grave la mutua induttanza. Non tanto per le difformità, ma per il tipo di difformità, poiché fa riflettere ciò che succede in un circuito in un circuito che non centra niente.

Quindi i parametri di mutua fra circuiti con funzioni diverse sono le cose più critiche e difficili da valutare e da notare visivamente.

Qui abbiamo due piste come quella vista in precedenza e i campi magnetici generati dalla corrente variabile nel tempo che scorre attraverso i conduttori, si concatenano tra di loro. Ovviamente a seconda della distanza dei fili si va sull'ordine dei nH per lunghezze di cm e ciò che contano sono i tratti di piste paralleli: perciò è da evitare lunghi tratti paralleli di piste che trasportano segnali a f elevata.

Stima Capacità filo



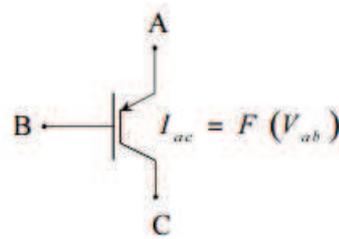
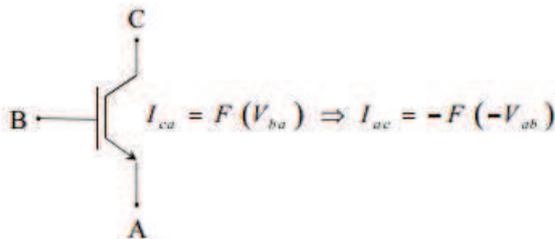
$x = 0.1\text{m}$ di filo AWG30 ($\phi = 0.01\text{ inch}$) tirato parallelamente ad un piano di massa a distanza $h = 5\text{ mm}$.

Dal formulario:

$$C = 55.6 \cdot 10^{-12} \cdot x \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{4 \cdot h}{\phi}\right)} = 1.3\text{ pF}$$

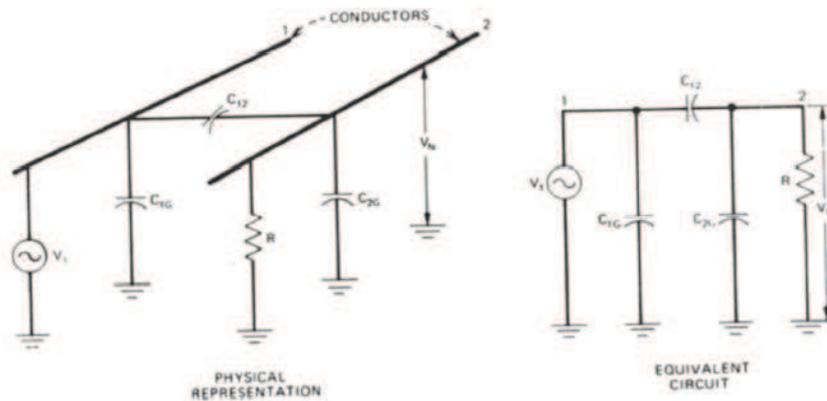
Per le C parassite si evidenzia l'uso di Gauss e l'ordine è di 1 o 2 pF, perciò in commercio non ci sono con valori piccoli poiché altrimenti si confonderebbero con le C parassite dei fili.

Anche in questo caso più è grande la pista e maggiore è la capacità. È particolarmente significativa la C parassita nei problemi di rumore all'interno dei Trans Resistivi come **Trans Resistori** o Fotodiodi.



Se avete un fotodiode a valanga come ricevitore si ha a che fare con un componente la cui corrente è generata dai fotoni che arrivano sulla giunzione. Occorrerà raccogliere tutta la corrente e amplificarla e dovremo quindi escludere tutte le fonti di rumore possibili. Tipicamente il primo stadio d'ingresso è un trans resistivo e la C a cui è attaccato il nodo è una grandezza critica.

Stima Mutua Capacità filo



Come per l'induttanza è particolarmente critico l'effetto dovuto alla mutua capacità che si instaura tra conduttori. La capacità vista prima era quella relativa ad un conduttore e il piano di massa: affligge il circuito, ma sostanzialmente non introduce disturbi. In questo caso la C tra due conduttori fa sì che quello che avviene su una pista si manifesta sull'altra. Questo è un problema per sistemi veloci (back panel) e tipicamente nella connettoristica dei componenti: ad esempio nei connettori multipolari si alterna un pin di segnale e uno di massa; questo non abolisce la C tra conduttore e massa, ma smorza quella mutua.

Problema dell'integrità dei segnali

**“There are two kinds of design engineers:
those that have signal integrity problems,
and those that will”**

Sicuramente nella vita di progetto capita di doversi preoccupare di fenomeni di compatibilità elettromagnetica che tipicamente hanno due facce:

L'integrità dei segnali riguarda sia il mondo analogico che digitale, e si riferisce al fatto che questo segnale trasporta un'informazione e quindi occorre mantenere il contenuto informativo inalterato. È un problema molto significativo, quando abbiamo dei circuiti digitali sensibili al trigger o con amplificatori non correttamente dimensionati. Quindi un aspetto dei problemi elettromagnetici riguarda **l'integrità dei segnali** e ci sono cose su cui porre attenzione sui pcb per mantenere il più possibile integro un segnale. Un altro aspetto dei problemi elettromagnetici riguarda la **compatibilità elettromagnetica**, cioè è relativo al fatto che le cose che noi creiamo possono rovinare il funzionamento di altri sistemi.

Sono due aspetti complementari:

- Si parla di integrità dei segnali quando è il nostro segnale ad essere disturbato
- Si parla di compatibilità elettromagnetica quando è il nostro segnale a disturbare il sistema esterno

È chiaro che quando si progetta su pcb spesso sono io che creo e subisco un disturbo. Perciò adesso valutiamo un insieme di problemi tipici che si possono manifestare sui PCB.

Ringging

Un problema tipico della propagazione di segnali è il ringging che si crea ogni volta che c'è una situazione del tipo RLC.

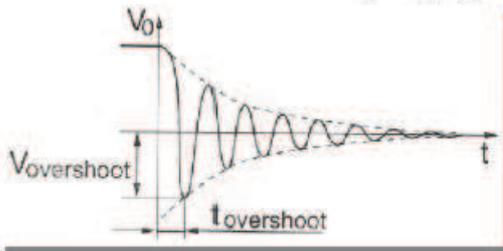
Ringing

Ringing legato al Q dei risonatori

$L < 1/6$ (costanti concentrate) non garantisce la mancanza di overshoot sulle transizioni: occorre considerare il *fattore di merito Q* del circuito.



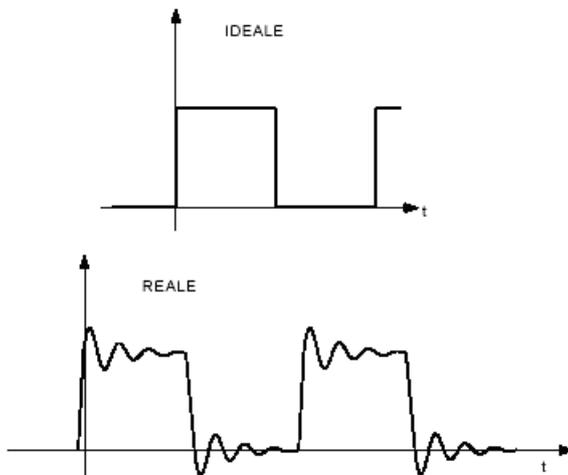
Per un circuito RLC serie $\Rightarrow Q = \omega_0 \frac{L}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$



Risposta al gradino, in prima approssimazione:

$Q < 1/2$	nessun overshoot
$Q = 1$	overshoot 16%
$Q = 2$	overshoot 44%

Questo avviene poiché si crea un circuito risonante. In questo caso il comportamento della rete è di tipo passa banda se sottoposto ad una oscillazione di tipo smorzante. Se la sinusoide oscilla alla frequenza di risonanza del gruppo e il Q ha un valore significativo allora la sinusoide si modifica. Se mandiamo un gradino, anche quando questo è esaurito, la frequenza risonante del gruppo fa sì che si veda un segnale di questo tipo. Tipicamente con un fronte in discesa si ha un UNDERSHOOT e poi delle oscillazioni. A seconda del fattore di merito Q si hanno o meno queste oscillazioni sul segnale. $Q=1/2$ è il discriminante per la presenza o assenza di tale fenomeno. All'aumentare di Q l'overshoot aumenta.

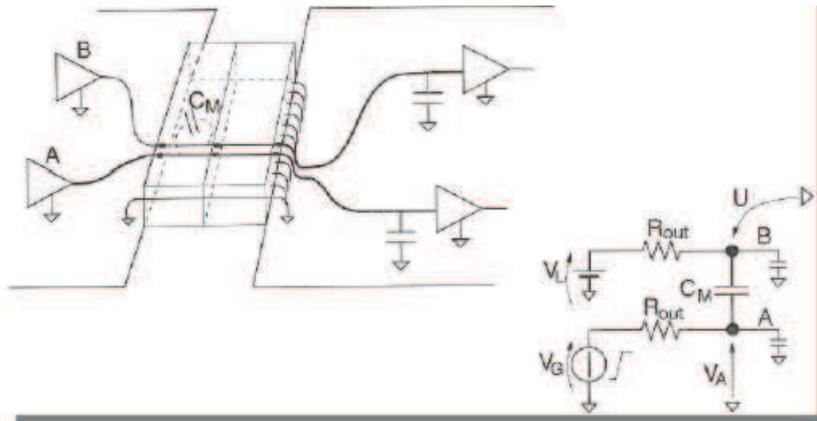


Questa è una situazione in cui c'è da preoccuparsi della R e L parassite aggiunte in relazione al tipo di segnale che si manda. Occorre lavorare sui valori di R e L per ridurre questo fenomeno, ma non solo. Occorre riflettere sul contenuto armonico del segnale che stiamo trasmettendo: se il segnale è digitale avremo che il suo contenuto armonico è legato alla frequenza e alla ripidità dei fronti.

Sicuramente usare T_{rise} e T_{fall} più veloci del necessario significa "volersi male". È il motivo per cui oggi la stragrande maggioranza di circuiti elettronici hanno la possibilità di programmare lo slew rate, affinché si possa rallentare un segnale quando non occorre che vada veloce. In questo modo si riduce il contenuto armonico alle frequenze più elevate che con maggiore probabilità possono sollecitare un circuito passa-banda costituito dalla pista d'ingresso di un circuito digitale.

Riflessione: a volte potremmo pensare di utilizzare i fronti più veloci possibili in fase di progetto, ma non è il modo giusto di pensare. Occorre valutare a che frequenza si lavora, il ritardo di propagazione delle porte e si usa il T_r e T_f più lenti possibili compatibili con la funzionalità del circuito.

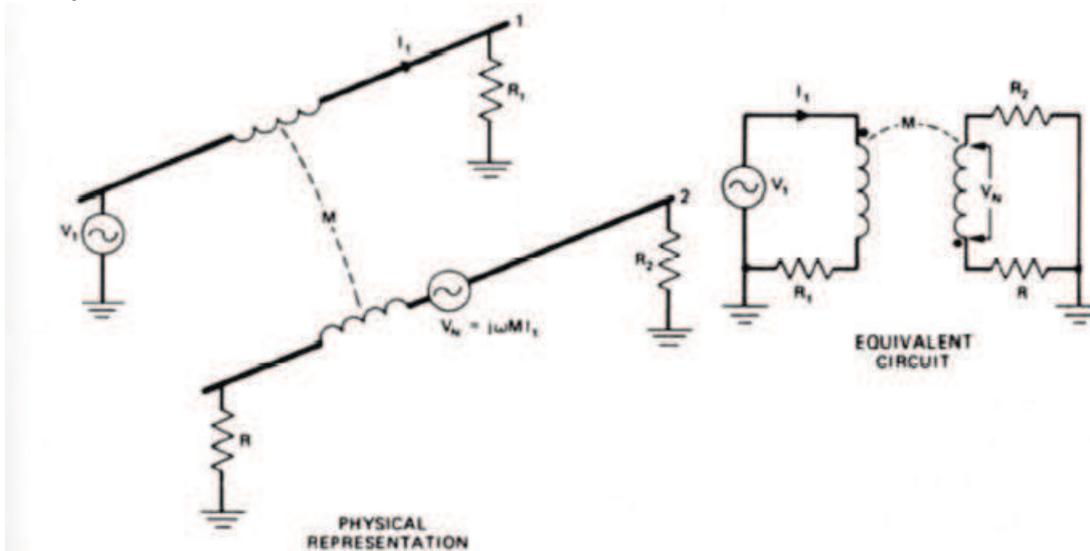
Esempio: connettore Board-to-Board



Due linee di collegamento A e B transitano attraverso un connettore che introduce una capacità mutua di accoppiamento $C_M = 2\text{pF}$. Entrambe le linee sono pilotate da porte TTL ($R_{out} = 30\Omega$, $t_f = 2\text{ns}$) e sono terminate su un carico capacitivo trascurabile. Stimare il disturbo U sul collegamento B quando A commuta ($\Delta V_G = 3.7\text{V}$)

È una situazione che si può verificare ed è stata utilizzata una capacità mutua piccola poiché i connettori sono vicini.

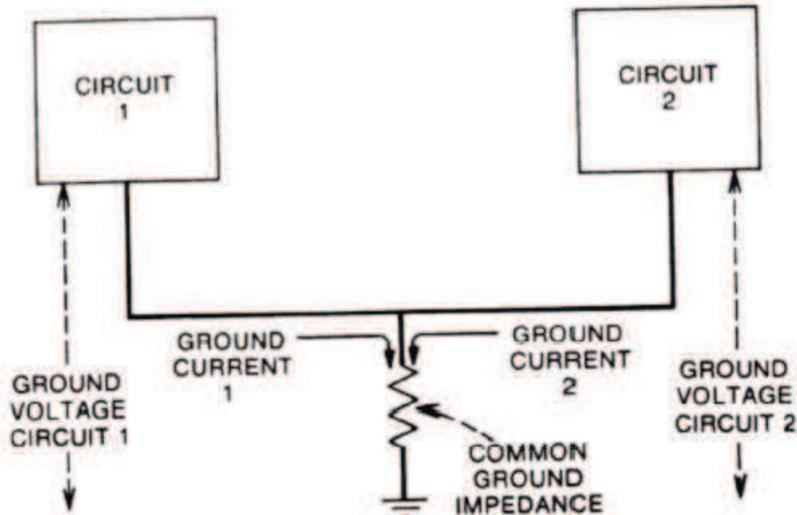
Esempio: Crosstalk induttivo



Si riduce questo problema evitando di disporre lunghi percorsi paralleli rettilinei.

Ritorni a massa

Questo è un altro meccanismo che porta a problemi di compatibilità elettromagnetica e integrità dei segnali tramite i ritorni a massa.

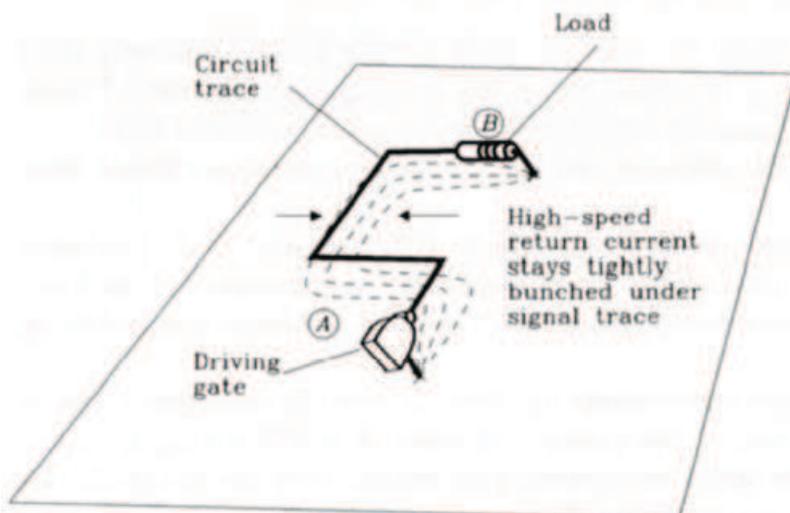


È tipico di circuiti interdipendenti digitali e analogici sulla stessa scheda. Il problema tipico è che se c'è un tratto a comune nel percorso di massa tra corrente digitale e analogica ci si può ritrovare una caduta variabile sul conduttore preso come riferimento. Questo può essere causato dal fatto che la corrente digitale oscilla ad una frequenza pari a quella di clock e quindi può creare una caduta variabile.

Questo problema si combatte separando le varie alimentazioni del sistema.

Quindi un criterio di qualità del pcb è individuare funzionalmente le diverse sezioni in cui è diviso il sistema e fare in modo che questi circuiti abbiano un loro percorso di alimentazione indipendente dal punto d'ingresso a massa, a costo di dovere duplicare le piste. Naturalmente questo a livello di CAD non è semplice poiché i collegamenti sono equipotenziali e si usano gli stessi simboli. Quello che si potrebbe fare è utilizzare simboli diversi e prevedere un punto dove poi, con un componente fittizio, si collegano i punti di massa a comune.

OSS. PIANO DI MASSA



Quando abbiamo un piano di massa e delle piste, nel richiudersi la corrente dove passerà? Si dividerà in modo omogeneo? No, farà il percorso a minima impedenza. Questa cosa è importante perché per valutare quanto è efficace la geometria del piano di massa bisogna sapere che **la minima impedenza cambia in funzione della frequenza visto che c'è un'induttanza parassita**. Se siamo in situazione di corrente continua, dove l'induttanza parassita rispetto alla R del piano è trascurabile, possiamo pensare che il percorso di ritorno sia una retta che unisce i due punti, essendo quello il cammino con minima impedenza.

Ma all'aumentare della frequenza non è più così: quando inizia ad aumentare la frequenza, il percorso preso dalla corrente sarà quello che rende minima l'autoinduttanza complessiva costituita da filo e ritorno. Quindi è il percorso in rame che minimizza l'area della spira. Quindi la corrente tende a passare sotto il filo!

Perciò è ragionevole pensare che sotto ad una pista ci sia effettivamente il piano di massa, poiché altrimenti se non ci fosse, l'induttanza parassita sarebbe grande, visto che la spira che si crea sarebbe grande.

Quindi in un circuito multi sezione è consigliabile controllare quali sono i percorsi che fa la sezione di alimentazione.

Questo aspetto è molto delicato e si affronta con diversi accorgimenti quali ad esempio il routing sezione per sezione con linee di alimentazione separate. La regione di potenza, di segnale e analogica hanno delle linee indipendenti e vengono unite in un punto il più vicino possibile al punto dove si produce l'alimentazione (al regolatore). Ovviamente se c'è un cavo che arriva dall'alimentatore al pcb lo stesso ci saranno i problemi. Un'altra strategia riguarda il contenuto ad alta frequenza di questo tipo di disturbo, cioè quello prodotto a causa di commutazioni veloci: si inseriscono nella rete dei condensatori (serbatoi) il cui effetto sia quello di fornire localmente il picco di energia utile al funzionamento del circuito; in termini rigorosi hanno un comportamento passa-basso.

Quindi le due strategie che si adottano sono:

- Separare le linee di alimentazione
- Dotare le linee di condensatori in punti strategici in modo da garantire un effetto passa basso sull'alimentazione

OSSERVAZIONE: soffermiamoci su come avviene questo filtraggio sull'alimentazione mediante *condensatori di filtro* (gergo tecnico)

Innanzitutto quando si fanno questo tipo di studi si valuta il tipo di carico e il tipo di rete che alimenta la sezione che stiamo esaminando per tenere conto delle eventuali grandezze parassite che ci possono essere sul percorso (es. cavo dall'alimentazione al pcb con L parassita). Perciò è tipico porre sul punto di accesso di ogni scheda e di ogni sottosezione un condensatore ragionevolmente grosso che tenga conto di una L significativa. Ecco perché nel punto di accesso o di arrivo dell'alimentazione si inserisce un elettrolitico da 47 o 100 uF. Questo serve per fornire energia al circuito tenendo presente che la significativa induttanza parassita del cavo provocherà cadute di tensione significative anche su variazioni di corrente che rientrano nel range dei milli secondi. Per tempi inferiori ai milli secondi l'elettrolitico non va bene, anzi addirittura il suo comportamento al di sopra del Khz diventa induttivo. Perciò non è un serbatoio "universale" e a causa di ciò si trova normalmente il parallelo ELETTROLITICO+CERAMICO. Quindi la **strategia classica è quella di disporre in tutte le ramificazioni delle alimentazioni dei condensatori filtranti. Inoltre ciò si fa normalmente anche in corrispondenza di ogni circuito da cui ci si aspetta un assorbimento di corrente di tipo impulsivo.** Quindi in prossimità di tutti i chip (micro, circuiti logici, circuiti logici programmabili, ecc) da cui ci aspettiamo un comportamento di tipo impulsivo, di norma il più vicino possibile ai terminali di alimentazione del chip si collocano i condensatori di filtro con il solito valore tipico.

Di solito nello schema elettrico non è che si prevedono a priori il numero di condensatori pari al numero di integrati e si collocano nel punto giusto, l'importante è che poi nel geometrico questi condensatori vengano messi nel punto giusto.

Per un settore specialistico gli strumenti a disposizione di un progettista per realizzare un sistema privo di eventuali disturbi elettromagnetici sono 3:

- Una buona **pulizia a priori del pc** con tecniche di filtraggio
- **Grounding:** studio della rete di alimentazione in modo da minimizzare le interazioni tra i circuiti, con particolare riferimento all'uso delle terre, cercando, quando c'è una corrente che alimenta un circuito, di capire da dove ritorna quella corrente
- **Shielding:** tipico nelle sezioni d'ingresso di segnali d'antenna, che sono inscatolate con materiale metallico per confinare gli effetti elettromagnetici del sistema

Per implementare quest'ultima funzione esistono anche delle scatole apposite per pcb, che servono a evitare interferenze sul segnale utile da parte di disturbi elettromagnetici che derivano dall'esterno.

Ma cos'è che soprattutto in ambito digitale, causa un elevato contenuto armonico dei segnali in banda?

Nel mondo analogico spesso si lavora in una banda stretta attorno ad una frequenza portante, quindi i conti si fanno in regime sinusoidale con l'analisi fasoriale. Nel progetto digitale a volte è difficile poiché oltre al clock, di cui conosciamo il comportamento, poi abbiamo dei segnali che commutano "ogni tanto" e quindi è difficile determinare se una pista risente delle interferenze con altri circuiti, a quali frequenze sono dovuti questi disturbi e di cosa bisogna preoccuparsi.

Allora nel gruppo di lucidi a seguire viene valutato il contenuto frequenziale di una transizione tipica digitale schematizzata con un fronte a rampa.

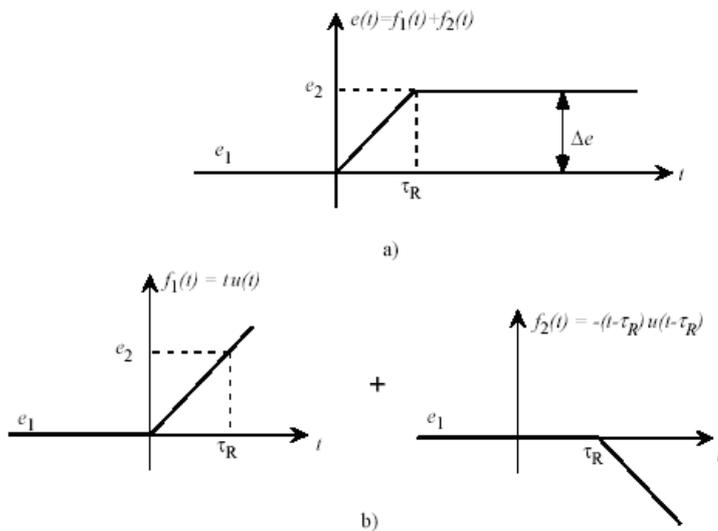


Fig. 2.1 Funzione di cambiamento di stato (a) come somma di due rampe (b)

Il punto in cui si passa da un andamento del tipo $\frac{1}{f}$ a quello $\frac{1}{f^2}$ corrisponde a

$$f_1 = \frac{1}{\pi\tau_R}$$

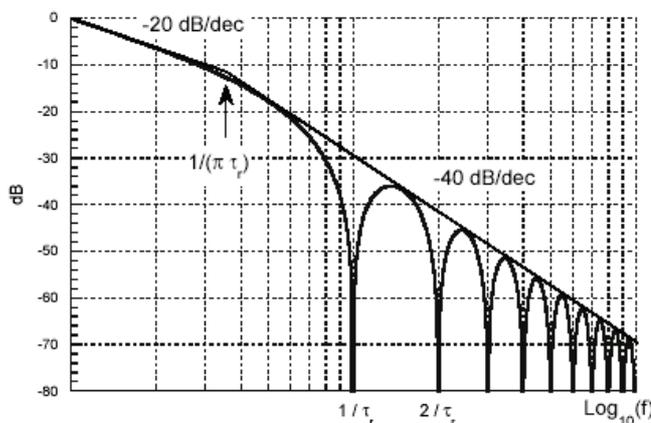


Fig. 2.2 Andamento in frequenza approssimato della trasformata di Fourier della funzione di cambiamento di stato

Andando a fare questa analisi si ha un contenuto frequenziale fatto di monti, picchi e valli e la cosa interessante è che l'andamento asintotico di un segnale di questo tipo è quello che scende giù con pendenza di -40 dB/dec. Dove però l'asintoto non tiene fino alle basse frequenze, ma c'è una regione iniziale dove l'andamento armonico è approssimato meglio con un tratto con pendenza da -20 dB/dec.

Un'altra cosa interessante è che una buona approssimazione del punto in cui cambia la pendenza è data da

$$\frac{1}{(\tau t)}$$

Ribadiamo:

In presenza di sistemi digitali quindi è irragionevole fare t_R e t_F più piccoli di un certo valore altrimenti aumentiamo le componenti frequenziali che disturbano il segnale.

Caratteristiche dei servizi tecnologici offerti commercialmente sul territorio

Ora andremo a vedere un esempio di una tecnologia offerta sul territorio: ci sono diversi produttori di tecnologie per pcb ed è stato scelto questo produttore per la qualità dell'interfaccia internet che propone. Adesso vediamo insieme come si interpretano tutte le informazioni che si trovano sul sito e poi andando sul sito si possono valutare i dettagli in maniera autonoma.

<p>HOBBY POOL</p> <p>per l'hobby 1/2 strati 2-8 pezzi 12 giorni lavorativi ulteriori informazioni...</p>	<p>QUICK PCB PROTOTYPE</p> <p>prototipazione veloce 2/4/6 strati 2-20 pezzi 2/4 giorni lavorativi ulteriori informazioni...</p>	<p>STANDARD PCB PROTO</p> <p>tutte le opzioni 2/4/6 strati 4-50 pezzi 6/8 giorni lavorativi ulteriori informazioni...</p>	<p>PCB PRODUCTION</p> <p>produzioni di serie 2/4/6 strati min. 1/2 metro quadro tutte le opzioni ulteriori informazioni</p>
---	--	--	--

La cosa interessante è che questa azienda cerca di affrontare varie esigenze di mercato proponendo diverse tipologie e soluzioni con caratteristiche differenti come si evince nello schema superiore: si va da un mercato che non ha esigenze di progettazione avanzate (hobby pool) fino alla piccola produzione (PCB PRODUCTION). Il trade-off si manifesta in termini di costo e tempi di produzione: ad esempio l'hobby pool ha tempi di consegna più lunghi poiché il costo è minore e si ammortizza, da parte dell'azienda, distribuendo i costi fissi su più progetti di clienti differenti.

Sul sito è presente un riquadro con le proprietà del materiale di supporto (**VETRONITE-FR4**)

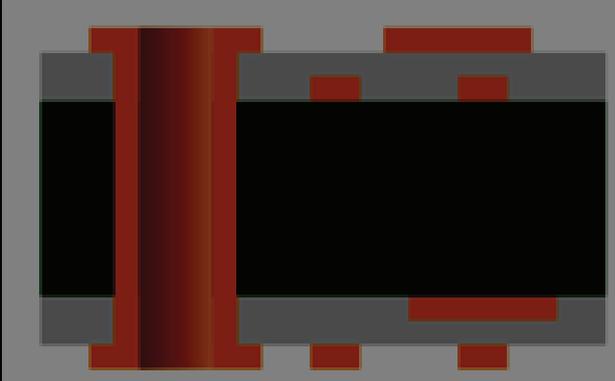
FR4 DATASHEET	
Test/Specification	FR4 Laminate Typical Values
Thermal Stress, Solder bath 288 deg. C	>60
Dimensional Stability, E-2/150	<0.04% Warp/fill <1.00% Bow/Twist
Flammability, Classification UL94	V0
Water Absorption E-1/105	0.10%
Peel Strength After Thermal Stress	11 lb./in After 10s/288 Deg. C
Flexural Strength	100,000 lbf/in ² Lengthwise 75,000 lbf/in ² Crosswise
Resistivity After Damp Heat Volume	10 ⁸ M ohms cm
Resistivity After Damp Heat Surface	10 ⁸ M ohms
Dielectric Breakdown. Parallel to laminate	>60KV
Dielectric Constant @ 1MHz	4.7
Dissipation Factor @ 1MHz	0.014
Q-Resonance @ 1 MHz	>75
Q-Resonance @ 50 MHz	>95
Arc Resistance	125 s
Glass Transition Temperature	135 Deg. C
Temperature Index	130 Deg. C
Specific Gravity	1.8-1.9
Rockwell Hardness (M scale)	110
Coefficient of Thermal Expansion	11 microns/m/Deg.C Lengthwise 15 microns/m/Deg.C Crosswise
Thermal Conductivity	2.2-2.5 cal/h. cm Deg C

Normalmente i supporti vengono acquistati e non prodotti dai produttori di pcb. Da questi dati si evince che ad esempio il supporto può resistere ad uno stress termico in bagno di saldatura a 288 °C per più di 60 secondi, oppure che è di classe V0 (la migliore) per quanto riguarda la caratteristica autoestingente del

pcb, in caso di incendi; ha un peso che determina l'affondamento del materiale se poggiato in un liquido (Specific Gravity); ha una conducibilità termica che va da 2.2 a 2.5 cal/h cm °C (questa caratteristica è specificata nel caso in cui vogliamo usare il supporto come dissipatore); il coefficiente di espansione indica lo stress meccanico a cui è sottoposto il supporto nel passaggio frequente da alte a basse temperature (Coefficient of Thermal Expansion).

Dopo aver visto il PCB, sul sito vengono mostrate le tecnologie totali e come sono realizzate, tenete presente che il pcb standard più diffuso è 1,6 mm di spessore. Di seguito una serie di illustrazioni prese dal sito, che mostrano appunto le diverse tecnologie per i vari spessori disponibili (0.8mm, 1.6mm, 2.4mm)

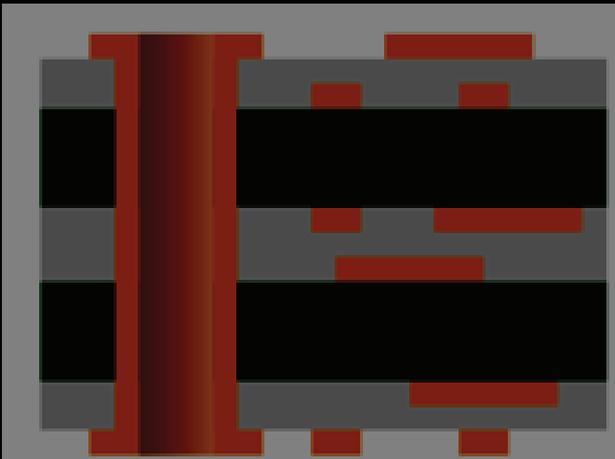
PCB a 4 STRATI :: spessore totale 0.8 mm



0.018 mm	Copper (Cu)
0.18 mm	1 x Prepreg #7628
0.4 mm	FR4
0.18 mm	1 x Prepreg #7628
0.018 mm	Copper (Cu)

Per semplicità riporto solo l'immagine relativa allo spessore 0.8mm, ma ricordate che possono variare gli spessori.

PCB a 6 STRATI :: spessore totale 0.8 mm



0.018 mm	Copper (Cu)
0.18 mm	1 x Prepreg #7628
0.2 mm	FR4
0.18 mm	1 x Prepreg #7628
0.2 mm	FR4
0.18 mm	1 x Prepreg #7628
0.018 mm	Copper (Cu)

OSS. È interessante sapere com'è fatta la struttura del PCB, perché così si possono valutare degli effetti capacitivi tra i vari layer in base alla distanza tra i layer.

Per realizzare un pcb con un determinato costruttore, ci saranno delle regole da rispettare: queste riguarderanno nomi e directory di posizionamento del file di uscita del nostro CAD e poi ci saranno altre regole più specifiche relative alla fase di progetto geometrico. Notate che alcune regole è bene osservarle, mentre altre vanno rispettato obbligatoriamente: se non rispettiamo una regola obbligatoria, il produttore

non procede alla tecnologia e ci avvisa che c'è un errore di layout (se avete scelto hobby poll se ne frega e ve lo da con il problema). Osservate che rispettare rigorosamente una regola, implica determinare chi si assume i costi della resa di un progetto.

Prendiamo in esame quindi quali regole vengono stabilite da un tipico produttore di PCB.

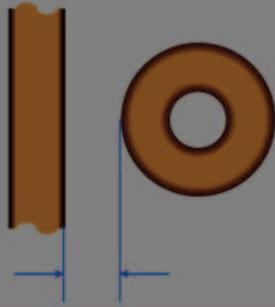
R2.1 : Isolamento
Applicabilita' : Tutti i PCB
Commenti : Regola da rispettare rigorosamente

L'isolamento tra due aree di rame contigue dovra' essere almeno:

- **Standard: 0.15mm (6mils)**
- **Avanzato: 0.1mm (4mils)**

L'isolamento "standard" e' disponibile senza costi aggiuntivi mentre l'isolamento "avanzato" ha un aggravio di costo. L'isolamento tra il rame e un lato di fresatura dovra' essere almeno (**0.2mm o 8mils**).

La violazione a questa regola causera' la sospensione dell'ordine.



Questa regola è relativa all'isolamento tra due aree di rame, notate che il costo maggiorato dell'isolamento avanzato è dovuto al fatto che l'azienda produttrice avrà maggiori scarti di produzione, cioè in fase di test elettrico, presumibilmente verranno buttate via più schede, poiché avranno dei vincoli da rispettare più stringenti.

Questa regola vale fra pad e piste, ma anche fra piste e piste o pad e pad. Ovviamente questa regola è legata all'accuratezza delle maschere e in particolare alla fase di attacco chimico che dovrebbe togliere il rame nel mezzo. Il CAD che abbiamo usato attivamente ci aiuta in questa fase ed è possibile attribuire alle piste un determinato spessore. Inoltre in fase di tracciamento, ci aiuta disegnando una linea sottile, che indica la regione di rispetto che non può essere invasa da altre piste metalliche. Notate come, nel mondo del CAD, normalmente la possibilità di usare una tecnologia è associata alla disponibilità di un file tecnologico, che racchiude l'insieme delle regole, strutturate in modo formale come un linguaggio di programmazione.

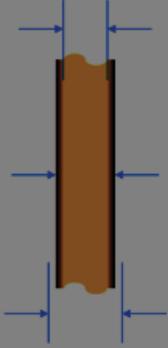
R2.2 : Spessore delle tracce
Applicabilita' : Tutti i PCB
Commenti : Regola da rispettare rigorosamente

Lo spessore delle tracce sui lati in rame dovra' essere almeno:

- **Standard: (0.15mm o 6mils)**
- **Avanzato: (0.1mm o 4mils)**

Lo spessore "standard" e' disponibile senza costi aggiuntivi mentre lo spessore "avanzato" ha un aggravio di costo.

La violazione a questa regola causera' la sospensione dell'ordine.



Un'altra regola è relativa allo spessore delle tracce ed è simile alla precedente, ciò vuol dire che la litografia di questo produttore è di 0.1mm e di conseguenza il **pitch** (distanza minima dall'asse di due piste) è di 0.2mm. Con questo processo e con questo pitch, possiamo infilare 5 piste per ogni mm di pcb: questa cosa è interessante da

R2.3 : Foro/diametro Pad
Applicabilita' : Tutti i PCB
Commenti : Regola raccomandata

Il pad minimo dovra' essere **0.4mm (16mils)** piu' grande del foro per fori sotto **2.0mm (79mils)** e **1mm (39mils)** per fori di diametro oltre **2.0mm (79mils)**. Questa regola e' raccomandata perche' non compromette la funzionalita' del circuito perche' il contatto elettrico e' assicurato dalla metallizzazione del foro; ha solo un impatto estetico e di affidabilita'. Di seguito e' riportata la tabella di corrispondenza tra fori e pad.

Hole	Pad
0.35mm (14mils)	0.75mm (30mils)
0.5mm (20mils)	0.9mm (36mils)
0.6mm (24mils)	1.0mm (40mils)
0.7mm (28mils)	1.1mm (44mils)
...	...
2.0mm (79mils)	2.4mm (95mils)
2.5mm (98mils)	3.5mm (137mils)
3.0mm (118mils)	4.0mm (157mils)
...	...

La violazione di questa regola "sospende" l'ordine se il cliente specifica la "revisione del progetto", altrimenti il circuito viene realizzato e spedito come specificato.



osservare in caso di progetti con grande connettività, in quanto se occorre far passare un bus da 20 fili (ad esempio), poi cambiano notevolmente gli spessori di ingombro sul pcb.

Questa regola è relativa alla foratura: nella specifica di un pad, quando si realizza il footprint, è importante avere questi dati che ci dicono quali sono le

dimensioni minime realizzabili. Per questi oggetti viene specificata una dimensione dell'anello che circonda il foro. Questa è una regola raccomandata e non obbligatoria, poiché nel caso in cui non venga rispettata, la CNC che si occupa della foratura potrebbe fare un buco decentrato rispetto alla piazzola, ma non compromette il funzionamento del sistema, poiché il contatto elettrico è garantito dalla metallizzazione del foro. La violazione di questa regola ha un impatto estetico, ma di solito comunque deve essere rispettata.

R2.4 : Espansione Solder Mask

Applicabilità : Tutti i PCB

Commenti : Regola raccomandata

La distanza tra pad e solder resist ottimale è **0.2mm (8mils)**. Il cliente dovrà settare il proprio programma CAD per generare questo tipo di distanza. Se il cliente specifica nell'ordine la "Revisione del Progetto" o il "test Elettrico" PCB-PROTO effettuerà le modifiche al lato solder mask per portarlo in condizione ottimale. Negli altri casi il circuito sarà costruito e spedito come specificato.



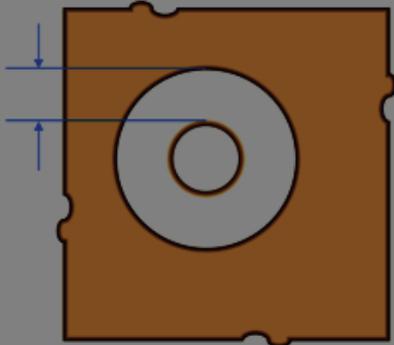
Visto che il CAD genera automaticamente la solder mask, allora occorre rispettare anche la prossima regola: "È bene che la solder mask venga specificata 0.2 mm più grande del pad."

R2.5 : Isolamento da un piano

Applicabilità : Circuiti multistrato

Commenti : Regola da rispettare rigorosamente

L'isolamento tra un foro non connesso ad un piano interno ed il piano stesso dovrà essere almeno **0.5mm (20mils)** per compensare tutti i possibili disallineamenti tra il rame e la fase di foratura. Questo vale anche nel caso il CAD usato metta comunque il pad ad un foro non connesso: in questo caso l'isolamento si dovrà considerare tra il pad ed il piano. La violazione di questa regola "sospende" l'ordine in ogni caso.



Questa regola è importante per i multilayer dove sicuramente avremo scelto dei piani di alimentazione, di massa: se dobbiamo fare un foro passante che porti il segnale dal top al bottom,

naturalmente la parte metallizzata interna non deve toccare i piani annegati nei layer interni. Quindi qui ci viene richiesta una distanza di rispetto da 0.5mm quindi con un foro passante da 1mm, il buco nel piano di massa dovrà essere di 2mm. Questa regola è importante perché riguarda l'accuratezza del progetto layer to layer. Mentre ad esempio le distanze tra piste riguardano una caratteristica interna al layer (quindi si può arrivare a valori più bassi), qui è coinvolto anche l'accuratezza dell'allineamento tra layer differenti.

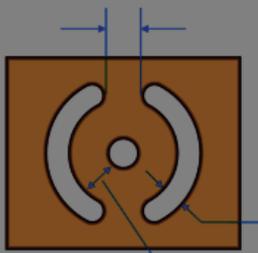
R2.6 : Connessione ad un piano (2 punti)

Applicabilità : Tutti i PCB

Commenti : Regola raccomandata

La connessione tra le piste ed un piano diffuso può essere effettuata tramite la connessione diretta o lo scarico termico. In questo ultimo caso ci sono tre parametri che caratterizzano completamente questo tipo di connessione. Lo spessore dei conduttori sono le aree di contatto con il piano. L'isolamento è lo spessore dell'isolamento intorno alla connessione. L'espansione è lo spazio tra il foro e l'isolamento. Questi parametri dovranno essere settati almeno ai seguenti valori:

- Conduttori > 0.2mm (8mils)
- Espansione > 0.5mm (20mils)
- Isolamento > 0.2mm (8mils)

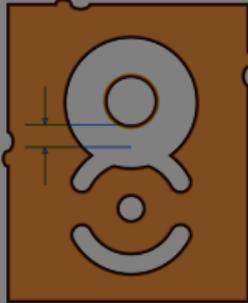


Adesso affrontiamo il problema dello **scarico termico**: quando occorre collegare qualcosa, ad esempio una via ad un piano si può utilizzare la connessione diretta, ma la maggior parte delle volte si preferisce (il CAD ce lo

consente) di realizzare una struttura simile a questa che si chiama Thermal Relief. Di cosa si tratta? Il problema è questo: sappiamo che quando si salda occorre che il pad e il piedino devono arrivare alla stessa temperatura superiore alla temperatura di bagnabilità della lega di saldatura. La presenza di un piano conduttore di rame crea un grosso ostacolo al raggiungimento di una temperatura locale di 300°C, specialmente se si tratta di un layer interno, poiché l'oggetto ha una buona conducibilità termica e quindi è difficile che piedino e pad siano alla stessa temperatura. In pratica ci arriva prima il pin e si crea una saldatura a freddo all'interno del foro metallizzato. Quindi una possibile soluzione per alleviare il problema è aumentare la resistenza termica dell'area di saldatura, rispetto al piano, togliendo del rame. Quindi il senso del Thermal Relief è proprio quello di ridurre la capacità di smaltire calore senza alterare significativamente le proprietà elettriche. **Quindi notate che fare uno scarico termico attorno ad un pin che serve per dissipare calore è un'assurdità!!**

In realtà il CAD fa automaticamente il Thermal Relief, cioè possiamo scegliere se annegare un pad nel piano di massa (CONNESSIONE DIRETTA) o creare una struttura del genere con espansione, isolamento e dimensioni prestabilite. Questo è un tipo di scarico, poi ce ne sono altri dove la divisione è stata fatta in 4 parti con regole simili applicabili anche ad altre forme, purchè vengano rispettati i criteri di taglio.

Poi c'è una regola che riguarda il rapporto che c'è fra un pad con scarico termico e un foro passante.

R2.9 : Invasione dello scarico termico	
Applicabilità : Tutti i PCB	
Commenti : Regola raccomandata	
L'isolamento tra la parte di isolamento di un foro non connesso ad un piano e il foro connesso ad un piano tramite uno scarico termico deve essere fissato ad almeno 0.2mm (8mils) .	

Noi sappiamo che il foro passante deve avere una zona di rispetto relativamente agli altri conduttori. In questo caso, rispetto al piano e allo scarico termico viene data una regola per cui l'isolamento della parte di foro connesso ad un piano con lo scarico termico deve essere fissato almeno a 0.2 mm.

Oltre alle regole di progetto ci sono delle indicazioni sulle regole di produzione: è interessante vedere che se prendiamo qualunque misura di pad (attenzione al datasheet per vedere se ci passa o no il reoforo) il produttore utilizzerà un valore significativamente maggiore di quello che abbiamo dato noi, poiché 150 decimi se li mangia la metallizzazione del foro. Quindi nella tabella abbiamo una differenza tra diametri reali e tecnologici. Queste di seguito sono le tabelle per la foratura:

Specifica	Punta usata	Foro finito
$\phi \leq 0,14\text{mm}$	Nessuna	Nessuno
$0,15\text{mm} \leq \phi \leq 0,19\text{mm}$	0,30mm	$0,15 \pm 0,03\text{mm}$
$0,20\text{mm} \leq \phi \leq 0,24\text{mm}$	0,35mm	$0,20 \pm 0,03\text{mm}$
$0,25\text{mm} \leq \phi \leq 0,29\text{mm}$	0,40mm	$0,25 \pm 0,03\text{mm}$
$0,30\text{mm} \leq \phi \leq 0,34\text{mm}$	0,45mm	$0,30 \pm 0,03\text{mm}$
$0,35\text{mm} \leq \phi \leq 0,44\text{mm}$	0,55mm	$0,4 \pm 0,03\text{mm}$
$0,45\text{mm} \leq \phi \leq 0,54\text{mm}$	0,65mm	$0,5 \pm 0,03\text{mm}$
$0,55\text{mm} \leq \phi \leq 0,64\text{mm}$	0,75mm	$0,6 \pm 0,03\text{mm}$
$0,65\text{mm} \leq \phi \leq 0,74\text{mm}$	0,85mm	$0,7 \pm 0,03\text{mm}$
$0,75\text{mm} \leq \phi \leq 0,84\text{mm}$	0,95mm	$0,8 \pm 0,03\text{mm}$
$0,85\text{mm} \leq \phi \leq 0,94\text{mm}$	1,05mm	$0,9 \pm 0,03\text{mm}$
$0,95\text{mm} \leq \phi \leq 1,04\text{mm}$	1,15mm	$1,0 \pm 0,03\text{mm}$
$1,05\text{mm} \leq \phi \leq 1,14\text{mm}$	1,25mm	$1,1 \pm 0,03\text{mm}$
$1,15\text{mm} \leq \phi \leq 1,24\text{mm}$	1,35mm	$1,2 \pm 0,03\text{mm}$
$1,25\text{mm} \leq \phi \leq 1,34\text{mm}$	1,45mm	$1,3 \pm 0,03\text{mm}$
$1,35\text{mm} \leq \phi \leq 1,44\text{mm}$	1,55mm	$1,4 \pm 0,03\text{mm}$
$1,45\text{mm} \leq \phi \leq 1,54\text{mm}$	1,65mm	$1,5 \pm 0,03\text{mm}$
$1,55\text{mm} \leq \phi \leq 1,64\text{mm}$	1,75mm	$1,6 \pm 0,03\text{mm}$
$1,65\text{mm} \leq \phi \leq 1,74\text{mm}$	1,85mm	$1,7 \pm 0,03\text{mm}$
$1,75\text{mm} \leq \phi \leq 1,84\text{mm}$	1,95mm	$1,8 \pm 0,03\text{mm}$
$1,85\text{mm} \leq \phi \leq 1,94\text{mm}$	2,05mm	$1,9 \pm 0,03\text{mm}$
$1,95\text{mm} \leq \phi \leq 2,09\text{mm}$	2,15mm	$2,0 \pm 0,03\text{mm}$
$2,1\text{mm} \leq \phi \leq 2,2\text{mm}$	2,3mm	$2,15 \pm 0,03\text{mm}$
$2,2\text{mm} \leq \phi \leq 2,3\text{mm}$	2,4mm	$2,25 \pm 0,03\text{mm}$
$2,3\text{mm} \leq \phi \leq 2,4\text{mm}$	2,5mm	$2,35 \pm 0,03\text{mm}$
...
$5,8\text{mm} \leq \phi \leq 5,9\text{mm}$	6,0mm	$5,85 \pm 0,03\text{mm}$

Osservate che oltre 6 mm i fori verranno fatti con la fresa. Il foro più piccolo finito è di 15 centesimi di millimetro e verrà usato per le vie più che per i montaggi.

Ma un dissipatore come si collega elettricamente? Il dissipatore di per sé non ha un senso elettrico, la sua finalità è quella di smaltire il calore e può essere collegato ad un regolatore di tensione.

Normalmente è il regolatore di tensione che porta a massa il dissipatore e non per forza un dissipatore lo dobbiamo collegare a qualche massa.

Perciò c'è la possibilità di fare i **fori di montaggio meccanici**, che vengono fatti alla fine e punta e foro coincidono, non come prima che differiscono a causa dello spessore della metallizzazione.

R3.2 : Fori non metallizzati		
Applicabilità : Tutti i PCB		
Commenti : Nessuno		
La tavola di foratura per i fori non metallizzati e' la seguente:		
Specifica	Punta usata	Foro finito
$0,5\text{mm} \leq \phi \leq 0,6\text{mm}$	0,55mm	0,55
$0,6\text{mm} \leq \phi \leq 0,7\text{mm}$	0,65mm	0,65
$0,7\text{mm} \leq \phi \leq 0,8\text{mm}$	0,75mm	0,75
$0,8\text{mm} \leq \phi \leq 0,9\text{mm}$	0,85mm	0,85
$0,9\text{mm} \leq \phi \leq 1,0\text{mm}$	1,05mm	0,95
...
$1,8\text{mm} \leq \phi \leq 1,9\text{mm}$	1,85mm	1,85
$1,9\text{mm} \leq \phi \leq 2,0\text{mm}$	1,95mm	1,95
$2,0\text{mm} \leq \phi \leq 2,15\text{mm}$	2,1mm	2,1
$2,15\text{mm} \leq \phi \leq 2,25\text{mm}$	2,2mm	2,2
$2,25\text{mm} \leq \phi \leq 2,35\text{mm}$	2,3mm	2,3
...
$5,85\text{mm} \leq \phi \leq 5,95\text{mm}$	5,9mm	5,9
$5,95\text{mm} \leq \phi \leq 6,05\text{mm}$	6mm	6

Note.

- I fori piu' grandi di 6mm verranno trattati come cave.
- La non metallizzazione di un foro e' specificata con l'assenza di un pad intorno al foro stesso. Se il cliente desidera una deroga a questa regola deve specificare la "Revisione del Progetto" nell'ordine e a questo punto puo' specificare i fori non metallizzati nel file di descrizione della foratura (filename.tol).

Anche qui i fori più grandi di 6mm si fanno con la fresa. Osservate che per specificare la non metallizzazione occorrerà fare il foro senza pad sul progetto geometrico, per farlo capire a questo produttore che abbiamo preso in esame.

Tolleranze di lavorazione

R3.3 : Tolleranze nella realizzazione
Applicabilita' : Tutti i PCB
Commenti : Nessuno
La realizzazione dei circuiti stampati comporta le tolleranze sotto elencate:
<ul style="list-style-type: none">• Tolleranza sullo spessore dei laminati FR4: 10%• Tolleranza sullo spessore del rame di base: 10%• Tolleranza sulle stampe (isolamenti, spessori...): 0.05mm• Tolleranza sul posizionamento serigrafie: 0.15mm• Tolleranza sul posizionamento solder mask: 0.15mm• Tolleranza sui fori metallizzati: ± 0.03mm• Tolleranza sui fori non metallizzati: +0.1mm, -0mm• Tolleranza sulle fresature: 0.2mm
Finiture superficiali:
<ul style="list-style-type: none">• Deposizione rame elettrolitico: $> 18\mu\text{m}$• Deposizione Sn/Pb: $> 10\mu\text{m}$• Doratura elettrolitica: Nickel ($> 4\mu\text{m}$) e Au ($> 1\mu\text{m}$)• Doratura chimica: Nickel ($> 4\mu\text{m}$) e Au ($> 0.08\mu\text{m}$)

Le tolleranze di lavorazione sono interessanti da vedere per capire qual è la precisione del produttore e la qualità della produzione. La tolleranza del 10% sui laminati è una tolleranza lasca, mentre quella sui conduttori e sulle dimensioni delle piste è migliore ovviamente. C'è da dire che i problemi d'isolamento e i problemi di dimensionamento delle piste sono problemi locali, queste tolleranze invece sono globali sulle dimensioni generali del PCB. Le serigrafie e solder mask sono meno critiche, mentre i fori non metallizzati potrebbero venire più grandi ed è un effetto che si ha quando la punta non taglia bene e asporta più materiale del dovuto. OSS. La deposizione Sn/Pb non è più ammessa adesso e serviva per garantire la saldabilità del PCB nel tempo. In realtà ci sono vari tipi di rivestimento per la saldabilità.

Per un ampio periodo e per alcune applicazioni anche oggi, si usava dorare tutte le parti del pcb che prevedevano parti mobili striscianti. L'ossidazione del rame nel tempo deteriorerebbe il sistema e quindi si metteva l'oro. Però col tempo l'oro si diluiva col rame e l'effetto dell'oro spariva, perciò veniva messo il nichel nel mezzo tra oro e rame.

Resa di realizzazione

R3.4 : Resa di Realizzazione
Applicabilita' : Tutti i PCB
Commenti : Nessuno
La resa di realizzazione per i circuiti stampati doppia faccia e' maggiore del 90%. Questo significa che nella produzione potrebbero esserci alcuni circuiti non funzionanti a causa di difetti su metallizzazione/foratura o imperfezioni sul substrato di FR4.
PCB-PROTO garantisce la sostituzione dei circuiti difettosi per mezzo della procedura di reso indicata nei "Termini e condizioni d'uso".
Nel caso il cliente non possa tollerare da subito una resa di questo tipo e' invitato a ordinare il test elettrico dei circuiti che, con sovrapprezzo, garantisce una resa maggiore del 99%.

La resa di realizzazione è maggiore del 90%, ciò significa che nella produzione ci può essere un 10% di circuiti non funzionanti e se lo restituiamo indietro lo cambiano. Con un costo in più l'azienda ti fa la verifica sul file gerber fino ad arrivare ad una resa del 99%.

DISSIPATORI E PROBLEMA DI SMALTIMENTO DEL CALORE

Ci poniamo di fronte al problema dello smaltimento del calore nella costruzione elettronica da 2 punti di vista:

-relazione che c'è tra la geometria delle piste, la corrente che passa nelle piste e quindi calore prodotto per effetto joule. Quindi il dimensionamento deve tener conto degli aspetti termici.

- La componentistica ha una certa efficienza che è il rapporto tra un prodotto finale e l'intera energia data al sistema. La differenza tra questi due termini si manifesta sotto forma di calore e come tale deve essere smaltito.

Per iniziare a ragionare in questi termini rispolveriamo un pò di fisica tecnica. L'approccio che seguiremo sarà un approccio di analogia tra grandezze elettriche e grandezze termiche in maniera tale da riportare tutto a circuiti facilmente risolvibili con le leggi di Kirchoff, in questo caso applicate alla trasmissione del calore.

Capacità Termica

Per capacità termica s'intende il rapporto tra la quantità di calore (Q) fornita al corpo e la corrispondente variazione di temperatura (T).

$$C' = \frac{Q}{\Delta T}$$

Noi forniamo calore ad un corpo ed esso in assenza di scambio termico aumenta la temperatura. Questa è la definizione di capacità termica.

(Si misura in Joule/Kelvin).

Ovviamente la capacità termica sarà proporzionale alla massa quindi si può definire la capacità termica per unità di massa e quindi definito per ogni tipo di materiale che è il **calore specifico**:

$$C = \frac{C'}{M}$$

Questo calore specifico ci dice l'attitudine di un certo materiale ad aumentare la propria temperatura quando viene somministrato calore.

Può essere utile riferirsi piuttosto che all'unità di peso, alla mole e si parla quindi di **capacità termica molare**.

$$C = \frac{C'}{M}$$

OSS: il legame tra calore e temperatura è lineare nelle ipotesi in cui queste variazioni di temperatura non modificano la struttura del materiale e quindi potrebbe essere anche una relazione non lineare.

Guardiamo una tabella di alcuni calori specifici:

TABELLA 1 CAPACITÀ TERMICHE DI ALCUNE SOSTANZE^a

<i>Sostanza</i>	<i>Calore specifico (J/kg · K)</i>	<i>Capacità termica molare (J/kg · K)</i>
Solidi elementari		
piombo	129	26.7
tungsteno	135	24.8
argento	236	25.5
rame	387	24.6
carbonio	502	6.02
alluminio	900	24.3
Altri solidi		
ottone	380	
granito	790	
vetro	840	
ghiaccio (-10 °C)	2220	
Liquidi		
mercurio	139	
alcool etilico	2430	
acqua di mare	3900	
acqua	4190	

^a Eccetto che per i casi segnalati, misurate a temperatura ambiente e a pressione atmosferica

L'alluminio "vince" perché quello che va a vantaggio dell'alluminio è che è leggero quindi è meno denso. Se invece ci riferiamo alla capacità termica molare dei metalli questa è sostanzialmente uguale per i vari materiali metallici perché la strutture molecolari sono simili. Quello che fa la differenza come già detto è la densità.

Può avere senso guardare tutto ciò per la scelta del materiale con cui costruire un dissipatore ossia un elemento che facilità la dispersione del calore e che tipicamente viene accoppiato con componenti elettronici di potenza.

Rispetto ai valori dei metalli e dei solidi vari l'acqua nella sua forma liquida ha un valore esagerato e ciò è noto.

Come già accennato l'aumento di temperatura di un corpo varia in maniera lineare con la quantità di calore fornita a quel corpo secondo il coefficiente di proporzionalità che è proprio la capacità termica dello stesso **se non si hanno modifiche alla struttura del materiale .**

Le modifiche più ovvie di un materiale sono i cambiamenti di stato.

Se siamo in presenza di cambiamenti di stato le cose cambiano in maniera abbastanza drastica.

Durante il cambiamento di stato il corpo resta a temperatura costante.

Il **calore latente** non è altro che il calore che serve per far avvenire completamente il passaggio di fase.

Normalmente nei circuiti elettronici il fatto che avvenga un passaggio di stato è una tragedia: fonde la scheda , fonde un componente etc e quindi comporta un guasto.

TABELLA 2 ALCUNI CALORI LATENTI

<i>Sostanze^a</i>	<i>Temperatura di fusione (K)</i>	<i>Calore latente di fusione (kJ/kg)</i>	<i>Temperatura di ebollizione (K)</i>	<i>Calore latente di evaporazione (kJ/kg)</i>
Idrogeno	14.0	58.6	20.3	452
Ossigeno	54.8	13.8	90.2	213
Mercurio	234	11.3	630	296
Acqua	273	333	373	2256
Piombo	601	24.7	2013	858
Argento	1235	105	2485	2336
Rame	1356	205	2840	4730

^a Le sostanze sono state elencate secondo l'ordine crescente della temperatura di fusione

Negli anni più recenti soprattutto con l'avvento dei notebook l'uso dei passaggi di stato nei sistemi elettronici è diventato molto frequente:

Se guardiamo il passaggio da liquido a gassoso dell'acqua ad esempio richiede un calore latente molto elevato e ciò può essere usato all'interno di un sistema elettronico per raffreddare (anche perché le temperature a cui avvengono i cambiamenti di stato per l'acqua ad esempio lo permettono). Ciò consente di creare un pozzo di calore senza cambiare la temperatura e ciò aumenta il potere di raffreddamento.

Spesso si creano fluidi appositi (tipo miscele di acqua e altre sostanze) che permettono di cambiare le temperature a cui avvengono i passaggi di stato sfruttando ciò a nostro vantaggio.

Nei nostri sistemi l'obiettivo finale sarà quello di raggiungere una situazione di regime in cui il calore prodotto è ceduto all'ambiente assumendo che quest'ultimo si comporti idealmente ovvero che sia in grado di assorbire qualunque quantità di calore senza variare significativamente la propria temperatura (pozzo termico).

Ci sono tre modi di scambiare il calore tra un sistema e l'ambiente:

- CONDUZIONE;**
- CONVEZIONE;**
- IRRAGGIAMENTO;**

La Conduzione avviene per l'agitazione termica delle molecole del materiale che sta conducendo calore; La convezione è associata anche ad uno spostamento di materia.

L'irraggiamento avviene perché l'agitazione delle particelle cariche dovute all'aumento di temperatura di un corpo genera onde elettromagnetiche e irradiano energia.

Normalmente nella produzione elettronica terrestre si lavora per convezione e conduzione. Per quanto riguarda l'irraggiamento questo fenomeno non viene trascurato nelle applicazioni spaziali perché non essendoci fluidi nello spazio non può esserci convezione. Quindi nelle applicazioni spaziali tutti i conti vengono fatti per irraggiamento o conduzione;

Non solo in alcune applicazioni in cui si usano potenze significative spesso si trovano delle restrizioni sull'uso in alta quota questo perché all'aumentare dell'altezza diminuisce la densità dell'aria e quindi le capacità di trasporto del calore per convezione si riducono rendendo il raffreddamento del sistema non sempre garantito.

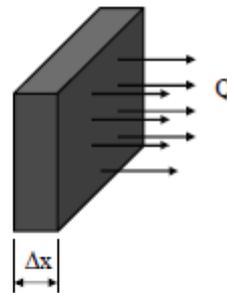
Di norma la prima parte di un dimensionamento di un dissipatore avviene per conduzione.

Conduzione

- **Data una lastra di**
 - Area A
 - Spessore Δx
- **Temperatura sulle due facce T e T+ ΔT**
- **H calore per unità di tempo**
- **K conducibilità termica**

$$H = \frac{Q}{\Delta t} \propto A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$$H = \frac{Q}{\Delta t} = kA \frac{\Delta T}{\Delta x}$$



Noi abbiamo l'area attiva di un componente che viene chiamata giunzione (questo vale anche per un mosfet).

Dall'area attiva del componente elettronico ci sono dei materiali in cui il calore si propaga per poi arrivare alla superficie del dissipatore. Poi si ha una seconda fase in cui il calore si trasmette per convezione.

Normalmente così si progetta: tutto si gestisce con la legge di Fourier che è l'equivalente della legge di ohm per quel che riguarda il calore.

Il k (conducibilità termica) dipende dai materiali come si vede dalla tabella:

TABELLA 5 ALCUNE CONDUCEBILITÀ TERMICHE^a

<i>Materiale</i>	<i>Conducibilità k (W/m·K)</i>
Metalli	
acciaio inossidabile	14
piombo	35
alluminio	235
rame	401
argento	428
Gas	
aria (secca)	0.026
elio	0.15
idrogeno	0.18
Materiale da costruzione	
poliuretano espanso	0.024
lana di roccia	0.043
lana di vetro	0.048
pino bianco	0.11
vetro per finestre	1.0

^a I valori sono a temperatura ordinaria.

Quindi se vogliamo realizzare qualcosa che porta via calore abbiamo una certa area, cercheremo di minimizzarne lo spessore e scegliamo il materiale più adatto alla nostra applicazione.

Perché l'alluminio vince sul rame nonostante abbia k più basso?

Per 2 motivi:

-costo;

-se si normalizzano questi valori con la densità di materiale ci accorgiamo che l'alluminio, che ha una densità più piccola del rame, si comporta in maniera migliore del rame; un dissipatore di alluminio sarà più leggero rispetto a uno di rame;

Avremo delle geometrie tipicamente più complesse, ma non sarà difficile individuare i vari strati di materiale che si susseguono dalla superficie attiva del componente fino alla superficie esterna del dissipatore e calcolarne la resistenza termica.

Il nostro obiettivo progettuale è quello di avere un'idea della resistenza termica globale per vedere a regime, a seguito di un assorbimento di potenza, la temperatura del nostro oggetto dove arriva, in maniera da garantirne il corretto funzionamento (quindi avremo ad esempio: il componente assorbe 10 W di potenza, c'è un certo numero di materiali tra lui e il dissipatore di cui si conosce la r termica, il nostro oggetto a che Δt arriva?).

CONVEZIONE

Questa è la parte di analisi che va dalla superficie del dissipatore verso l'esterno. La convezione è il calore che viene portato via verso l'esterno dal movimento dei fluidi che a contatto con una superficie si scaldano e si spostano e circolano.

La legge della convezione è la seguente:

$$H = h \cdot A \cdot \Delta T$$

La convezione è di due tipi:

-convezione naturale in cui il fluido diminuisce la sua densità e quindi va verso l'alto. Per questo sistemi di raffreddamento a convezione naturale hanno dei posti privilegiati (hanno ad esempio le alette verso l'alto) e quindi non è indifferente come li mettete (se le alette sono orizzontali ad esempio potrebbero "intrappolare" l'aria e quindi non garantire la convezione);

-convezione forzata qui c'è un elemento meccanico (una ventola) che garantisce una certa velocità del fluido a contatto con la superficie...normalmente c'è un fattore 4 o 5 di differenza tra resistenza termica di un dissipatore a convezione forzata o naturale ma questo tipicamente dipende dalla velocità del flusso d'aria e quindi è un parametro di progetto per dimensionare la ventola.

IRRAGGIAMENTO

$$H = \sigma \cdot \epsilon \cdot F_{he} \cdot \Delta T^4$$

Nell'irraggiamento la legge prevede un delta T alla quarta e quindi è pesantemente non lineare e in linea di massima si trascura anche perché il sistema elettronico è contenuto in un contenitore quindi lo scambio con l'esterno non è significativo. Lo scambio interno al contenitore avviene in modo che il componente più caldo irradia su quelli più freddi e di ciò è difficile tenerne conto.

Lo scambio per irraggiamento diventa significativo per temperature dell'ordine del centinaio di gradi.

Per i componenti elettronici salvo applicazioni spaziali ciò si trascura.

Resistenza termica

- **Trascurando l'irraggiamento**
 - **Proporzionalità fra salto termico e potenza trasferita**

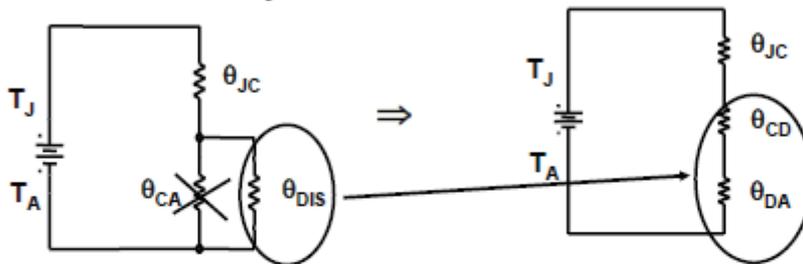
$$T_j - T_a = \Theta_{ja} \cdot P_D$$

- T_j = Temperatura di giunzione
- T_a = Temperatura ambiente
- Θ_{ja} = Resistenza termica giunzione ambiente
- P_D = Potenza dissipata

Noi richiederemo tutti questi aspetti in un parametro teta che è la resistenza termica teta giunzione ambiente e faremo considerazioni a regime (come se fossimo in DC) e alla fine dovremo trovare il delta T sapendo la potenza da dissipare, teta ja lo scegliamo noi con le scelte fatte per il dissipatore e come abbiamo collegato il case al dissipatore, ta dipende dal range applicativo (range consumer sarà 0%70 gradi , industriale di più, automotive di più, militare di più ancora) . Siamo vincolati quindi a tenere sotto controllo la Ta che a seconda della tecnologia va da 125 gradi a 155 gradi. Tenendo presente questa schematizzazione si ha una situazione di questo tipo :

Resistenza termica

• In base all'equivalenza termica



$$\Delta T = \Theta \cdot P_D \quad \Theta_{JC} = \frac{200 - 25}{150} = 1.17 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad \Theta_{CD} = 0.1 \div 0.4 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$\Delta T = 200 - 40 = 160 \text{ } ^\circ\text{C} \quad P_D = 31 \text{ W}$$

$$\Theta_{TOT} = \frac{\Delta T}{P_D} = \frac{160}{31} = 5.16 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$\Theta_{DA} = \Theta_{TOT} - \Theta_{JC} - \Theta_{CD} = 5.16 - 1.17 - 0.4 = 3.5 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

C.S.E.

10.19

Si mette di solito un generatore di corrente (nella figura c'è un generatore di tensione, è errato il disegno) con la potenza termica e poi si schematizzano con resistenze serie e parallelo che dipendono dal montaggio che abbiamo usato e Tj e Ta sono i valori di temperatura che si misurano ai capi della resistenza serie.

Qui teta jc è la resistenza junction case che ci dà il costruttore quindi è la resistenza termica dall'area attiva fino alla superficie del package.

Spesso il produttore ci dice anche la teta case ambient per componenti che non necessitano di dissipatore. Le resistenze termiche si misurano in gradi per watt.

Il nodo di massa è a temperatura ambiente e poi in cima si ha la temperatura di giunzione quindi possiamo valutare se per la massima temperatura ambiente siamo dentro alla temperatura di giunzione limite.

Se non ci siamo possiamo cercare di ridurre la teta totale togliendo la teta case ambiente e mettere un dissipatore che termicamente è diviso in due parti che è la teta case dissipatore (resistenza di contatto) e la teta a che è la resistenza termica per convezione del dissipatore.

La teta cd si può fare molto piccola nel caso in cui si può garantire un contatto liscio tra la parte metallica del case e il dissipatore. La porosità delle superfici quindi degrada questo parametro perché non garantisce il perfetto contatto tra i 2 corpi, quindi **è importante notare che per migliorare il contatto esistono paste che riempiono gli spazi vuoti e creano un ottimo contatto.**

Spesso tuttavia non si può fare perché il case è elettricamente connesso a qualcosa (ad esempio il drain di un mos) e in questo caso non si può attaccare metallo e metallo perché la tensione del dissipatore sarebbe uguale alla tensione di collettore e ciò non è auspicabile.

Allora spesso ci sono degli elementi isolanti con capacità termiche decenti che però comunque vanno a far parte della teta cd.

Anche la forza con cui i componenti vengono fissati al dissipatore è un aspetto importante infatti molti costruttori la specificano dicendo questo componente va fissato con una o due viti con questa coppia di forze che può essere regolata con delle opportune chiavette dinamometriche garantendo che la coppia dinamometrica è quella garantita.

La parte dell'analisi a regime è sempre abbastanza semplice ma se uno si trova di fronte a un'analisi in transitorio in cui le potenze dissipate sono dissipate solo per tempi brevi?

Questo è tipico dei sistemi che devono gestire un impulso di potenza tipo switching. E' ovvio che se noi dimensionassimo sulle potenze di picco verrebbero fuori dissipatori mostruosi.

L'analisi in transitorio è molto più complessa però da questo punto di vista ci vengono incontro i simulatori elettrici.

Per ragionare in termini di transitorio dovremmo aggiungere le capacità termiche nei vari nodi che corrispondono alle capacità termiche dei vari materiali e dove il calore prima di innalzare la temperatura deve caricare il condensatore. Quindi se noi mettiamo in ogni nodo la capacità termica del materiale tenendo conto della sua massa e simuliamo un circuito RC a più costanti di tempo con spice riusciamo ad avere un'idea della situazione e ciò è importante perché se ho un picco di potenza e ho a che fare con un componente con una piccola capacità termica e la costante di tempo RC fosse bassa potrebbero bastare poche frazioni di secondo per arrivare a Tj non sopportabili.

(La risoluzione di un circuito a più costanti di tempo non è banale).

Qui ci sono un pò di dissipatori:

Ad alta potenza

Per un adesivo a conduzione termica, si prega di consultare il Codice 554-311.
Dissipatori provvisti di alette, rifiniti in nero (estremità comprese). La resistenza termica indicata si riferisce alla posizione verticale.
Nota: per "Lu" si intende la lunghezza delle alette

0,29°C/W 0,29°C/W

Lu.250 Lu.300
La.300 La.300
Al.40 Al.40
403-112 264-670



Resistenza termica	Codice	Prezzo cad. €	
		1-24	25-99
0,29°C/W	403-112	92,92	78,98
0,29°C/W	264-670	83,76	71,20

0,5°C/W Universale

Esempio combinazione di due dissipatori di calore adatti per il raffreddamento con ventilatori

Lu. 250mm
La. 119mm
Al. 63mm
658-025



Resistenza termica	Codice	Prezzo cad. €	
		1-24	25-99
0,5°C/W	658-025	37,98	32,28

2,1°C/W 1,5°C/W

Lu.100 Lu.200
La.124 La.125
Al.26,7 Al.27
401-403 264-692



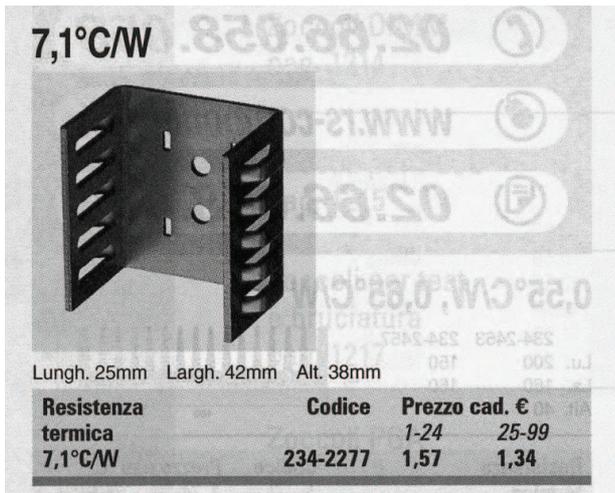
Resistenza termica	Codice	Prezzo cad. €	
		1-24	25-99
2,1°C/W	401-403	6,13	5,21
1,5°C/W	264-692	12,22	10,39

3,5°C/W 3,0°C/W

Lu.75 Lu.87,5
La.108 La.108
Al.14 Al.14
403-156 403-061



Resistenza termica	Codice	Prezzo cad. €	
		1-24	25-99
3,5°C/W	403-156	4,95	4,21
3,0°C/W	403-061	5,60	4,76



Ad alta potenza si può scendere sotto il grado per watt però è di grosse dimensioni e quindi il prezzo è alto. 0,5 gradi/watt.

Qui si sale mezzo grado per watt e questa è una soluzione classica perché le alette sono sagomate in modo che se ne mettono due interfacciate per realizzare un sistema a convezione forzata che spara lungo le alette. Qui ancora aumenta la resistenza termica e gli oggetti sono più piccoli.

Poi abbiamo oggetti compatibili con montaggio su pcb.

Abbiamo poi quello da 7,1 gradi per watt.

Tra transistori e pcb ci si mette questo dissipatore e quindi questo è un caso in cui è bene tenere presente cosa c'è intorno per favorire la dissipazione.

Per concludere la lezione dobbiamo occuparci delle piste dei pcb.

Oggi molti componenti di medie potenze possono presentare dei pin appositi che vengono saldati direttamente su pcb in cui sono lasciate delle zone di rame appositamente studiate per favorire lo smaltimento del calore direttamente su pcb.

Il limite di usare lo stesso pcb come dissipatore sta nello spessore del rame.

Le piste ovviamente sono sede di effetto joule e questa corrente dissipata se ne dovrà andare per convezione.

Queste due tabelle sono alla base del dimensionamento delle piste esterne e interne.

(For use in determining current carrying capacity and sizes of etched copper conductors for various temperature rises above ambient.)

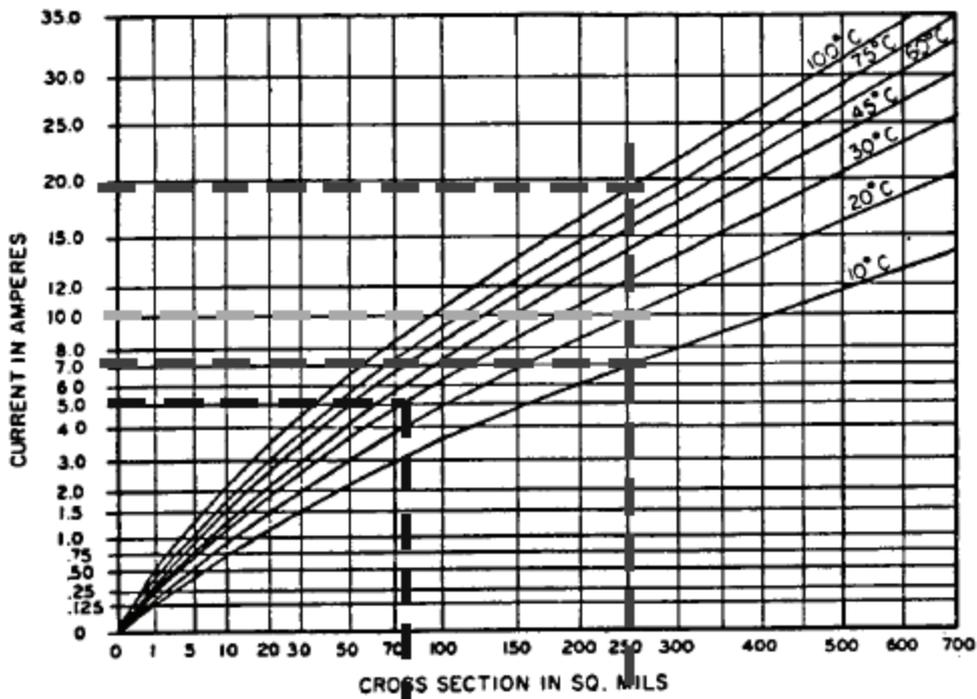


Figure A External Conductors

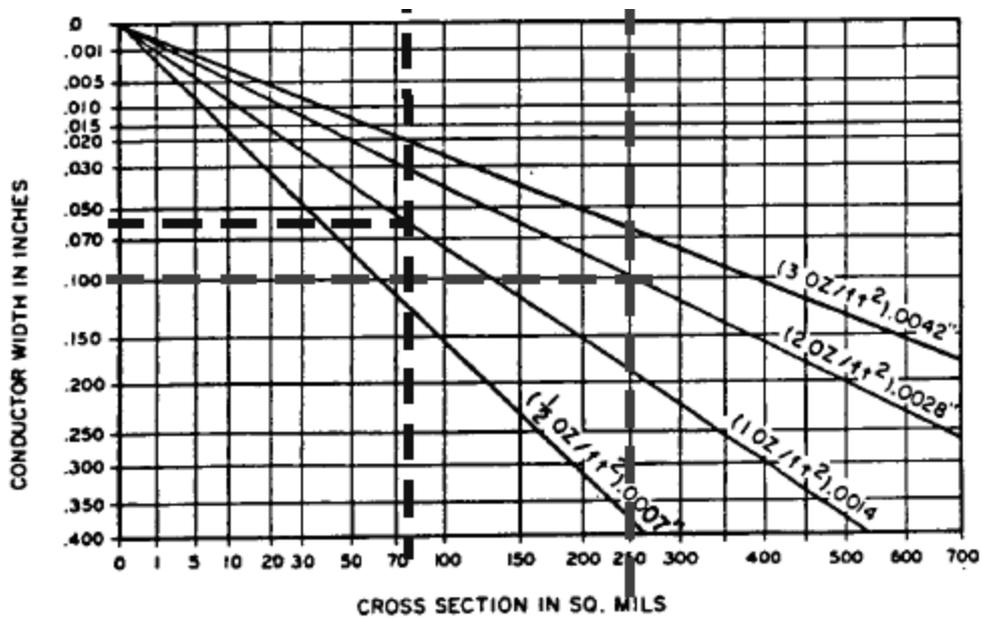


Figure B Conductor width to cross-section relationship

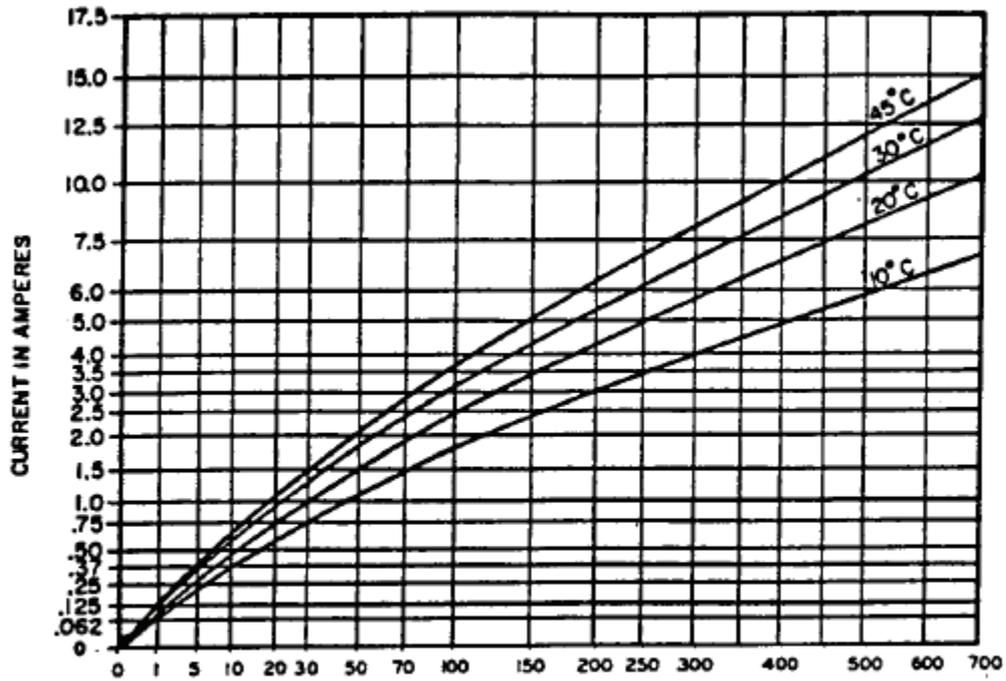


Figure C Internal Conductors

Queste tabelle si usano sapendo che in una pista con una certa geometria ci passano tot ampere e quindi vedo il delta t di quanto sarà e questo è un dato che devo tenere in conto.

Quindi un buon dato di progetto è quello di fissare un delta t di 5 o 10 gradi. Con l'uso di questi grafici è facile dimensionare una pista in maniera che abbia certe caratteristiche di dissipazione.

Kicad ha un tool apposito che ci permette di calcolare tutto ciò senza riferirci per forza a questi grafici.

Affidabilità di un sistema elettronico: RELIABILITY

Il termine affidabilità ha un'accezione di tipo comune che indica qualcosa su cui si può fare affidamento, però in ambito ingegneristico noi dobbiamo andare oltre e impostare una teoria di tipo quantitativo, poiché dobbiamo essere in grado di misurare le cose e di proporre eventuali soluzioni progettuali e costruttive che possano adempiere al loro compito con elevata probabilità. Quindi da questo punto di vista, la progettazione non può fare a meno di capire come si comporterà questo oggetto prodotto nella storia.

Nell'ingegneria ci si riferisce alla **Teoria dell'affidabilità**, che prende a prestito un supporto matematico dalla teoria della probabilità, visto che non siamo nel dominio deterministico e dalla disciplina che cerca di legare questi fenomeni sperimentali con la teoria aleatoria, cioè la statistica.

Una volta definito in modo rigoroso il concetto di affidabilità, cercheremo di risolvere il problema di come valutare l'affidabilità dei componenti e delle soluzioni circuitali che usiamo nei nostri sistemi. Poi ci porremo brevemente il problema di come intervenire progettualmente per incidere e modificare l'affidabilità di un sistema.

Come si fa a garantire certi parametri affidabilistici sottoscrivendo un contratto per cui vengano garantite certe qualità? Nei capitolati di fornitura questi concetti si traducono nel superamento di alcune prove da parte di una certa quantità di componenti presi a caso tra i lotti di produzione. Ovviamente le prove di cui si parla sono prove lunghe e non esaustive, perciò l'affidabilità impegna chi costruisce a rispondere di ciò che ha fatto per un tempo abbastanza lungo pari ai termini di garanzia. Ci sono due strade differenti che utilizziamo per progettare l'affidabilità di un sistema:

- **Di tipo Costruttivo:** cioè si costruisce l'oggetto, si valutano i difetti che si manifestano e si interviene
- **Di tipo Progettuale:** dove si introducono degli elementi di ridondanza per migliorare e garantire l'affidabilità del sistema che non può essere raggiunto per un eventuale riparazione di un danno. Pensate ad un satellite nello spazio che possiede una ridondanza quadrupla, cioè ci sono 4 sistemi equivalenti che garantiscono il funzionamento dell'intero satellite anche se un sistema dei 4 si rompe. Nota: è necessario ripristinare sempre le condizioni di ridondanza complessiva per garantire sempre la stessa affidabilità.

Per gestire queste cose esiste uno strumento importante che è il FMEA (Failure Mode and Effects Analysis), cioè una procedura con la relativa documentazione, che ogni azienda mette a punto per gestire gli effetti affidabilistici.

Reliability

L'affidabilità è una funzione $R(t)$ ed indica la capacità di svolgere una funzione specificata, non una cosa generica, ma deve essere ben chiaro quali sono le specifiche delle cose che ci aspettiamo che compia il sistema in esame. Ad esempio se usiamo un cellulare come fermacarte, questo ha un'affidabilità elevatissima, ma non è il compito per cui è stato progettato. Inoltre per parlare di affidabilità occorre anche specificare un tempo. Quindi R è un numero che fa sempre riferimento al tempo di missione, quindi un oggetto è affidabile o meno a seconda di quanto ci si aspetti che viva.

Perciò il tempo di missione è critico per il progettista, poiché il tempo ha un effetto su tutto. Per arrivare ad attribuire questo valore $R(t)$ agli oggetti, occorre una teoria quantitativa. Quindi ci riferiamo alla teoria della probabilità in maniera assiomatica. Ma notate che il problema grosso a cui la matematica non può dare risposta è a *come associare la probabilità di un evento all'evento stesso*. Quest'ultimo problema viene risolto mediante la statistica: esistono tecniche per cui, in modo ragionevole, vengono associati eventi alla loro probabilità che si verifica.

Perché è importante l'affidabilità?

Per due ordini di motivazioni importanti:

- **ECONOMICI:** poiché quando si costruisce un sistema, questo è fatto per svolgere una funzione e se la funzione viene meno, presenta un doppio tipo di danno (che gli assicuratori conoscono bene):

- Diretto: tra cui il costo del sistema stesso.
- Indiretto: costi opportunità della mancanza del servizio atteso

Es. Se faccio un incidente, oltre a rompere la macchina dopo vado a piedi.

A volte la mancanza del servizio atteso può avere costi molto maggiori del danno del dispositivo: pensate ad un dispositivo che è di supporto alla vita di una persona nel settore medico. Se un respiratore smette di funzionare e muore il paziente, poi il costo della mancanza del servizio è incommensurabile.

- **GIURIDICI ED ETICI:** poiché il mancato funzionamento di un sistema può causare danni enormi da poi ripercuotersi in termini giudiziari. Es. pensate alla Costa Concordia che si è arenata all'isola del giglio causando morti, feriti e distruzione: oltre all'errore umano saranno chiamati in causa i sistemi elettronici di gestione della nave.

PERCIÒ, DA FUTURI PROGETTISTI ELETTRONICI, È SEMPRE BENE PENSARE IN ANTICIPO ALLE CONSEGUENZE CAUSATE DA UN MANCATO FUNZIONAMENTO DI CIÒ CHE STIAMO PROGETTANDO.

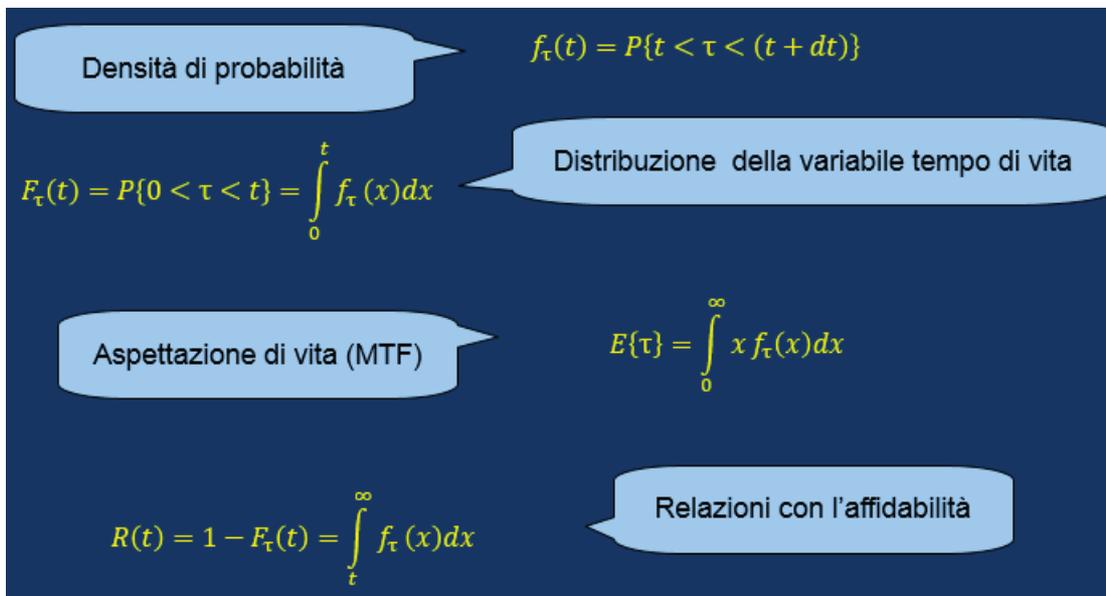
Quindi $R(t)$ è l'affidabilità di un sistema nell'adempiere il proprio compito, rispettando le specifiche ben definite, per un tempo di missione t . L'evento che porta al mancato adempimento del proprio compito da parte del sistema si definisce **guasto** (*fault*). Sicuramente possiamo legare l'affidabilità (capacità di sopravvivere) con la capacità di vivere. Quindi se prendiamo una variabile aleatoria (**tempo di vita del sistema**) possiamo dire che l'affidabilità è la probabilità dell'evento [tempo di vita > t].

$$- R(t) = P\{T > t\}$$

Quindi T (*tempo di vita*) è una variabile aleatoria definita positive, che inizia con la nascita dell'oggetto e si conclude col guasto.

OSS. Ci sono molte somiglianze con le scienze demografiche.

Come tutte le variabili aleatorie, cerchiamo di descrivere T con delle caratteristiche che chiamiamo **statistiche della grandezza**:



Dove:

1. **Densità di probabilità:** è la probabilità che il tempo di vita sia compreso in un intorno infinitesimo del tempo t , cioè che il guasto avvenga tra t e $(t+dt)$.
2. **Distribuzione della variabile T :** integrale della densità di probabilità (oss. Va da 0 a t poiché T è *definito positivo*). Indica la probabilità che il Sistema funzioni correttamente tra 0 e t . E' interessante osservare che questa definizione è quella complementare alla definizione di

affidabilità: infatti se la distribuzione della variabile T indica che l'evento vive tra 0 e t , a noi interessa che un oggetto sia affidabile, cioè che viva da t in poi.

3. **Aspettazione di vita (MTF → Mean Time to Failure):** la sigla MTF è ciò che di solito si trova sugli oggetti tipo hard disk. Molti oggetti elettronici hanno una caratterizzazione di questo tipo.
4. **Relazioni con affidabilità:** complemento a 1 della densità di probabilità

Definizione di guasto

Il guasto va definito in maniera più precisa rispetto alla definizione sopra esposta. Si prova a classificarlo dandogli degli attributi, perciò in letteratura si parla di modo, tempo e gravità dei guasti.

Classificazione dei guasti

- *Relativamente al modo:*
 - 1) SISTEMATICI
 - 2) OCCASIONALI

- *Relativamente al tempo:*
 - 1) PERMANENTI
 - 2) TEMPORANEI:
 - a) Intermittenti
 - b) Transitori

- *Relativamente alla gravità*
 - 1) CATASTROFICI
 - 2) PARAMETRICI

Queste modalità di classificazione sono importanti per capire bene quali sono i limiti della nostra teoria. Quindi in ambito ingegneristico si tende a distinguere tra:

- Guasti **SISTEMATICI**: ci si mette tutto quello che è più deterministico in quanto legato o al progetto o alla modalità produttiva. Tipicamente un guasto è sistematico quando è presente in tutti gli esemplari prodotti o in un lotto intero.

È chiaro che la teoria dell'affidabilità non riguarda questo tipo di danni. Di solito il difetto di progetto, quando si arriva alla produzione, dovrebbe essere stato eliminato: tutte le fasi dal prototipo alla produzione in cui si valida la qualità del progetto servono proprio ad eliminare i difetti sistematici e queste fasi si chiamano DEBUG. Fino a che i firmwares e l'hardware è semplice il debug, con un po' di pazienza si porta a termine in maniera completa. Ma per progetti complessi non si può avere la garanzia di avere escluso, soprattutto dal software, i guasti sistematici insiti nel sistema sin dal progetto. A nostra consolazione si può dire che arrivati ad un certo livello di debug, anche il guasto sistematico si assimila al guasto occasionale. Quindi se Windows si blocca e ci dà la schermata blu, vuol dire che è un bug del sistema e se chiamiamo l'assistenza ci diranno di spegnere e riaccendere e non succederà più, poiché è stato dovuto ad una situazione hardware/software che si verifica ogni 10000 volte.

- Guasti **OCCASIONALI**: quando è presente solo in un singolo esemplare di una produzione. A cos'è legato? A cause aleatorie indipendenti dall'esemplare e possono avvenire in produzione, allora sarà un guasto congenito, oppure può insorgere durante la vita operativa del sistema.

Questa è una divisione rigida, ma ci sono delle sfumature in realtà. Infatti ci sono dei guasti occasionali che hanno una componente sistematica: ad esempio se una pista non è dimensionata correttamente e un dispositivo viene sottoposto a condizioni di stress particolari, poi a lungo andare si può presentare un guasto occasionale, poiché non avviene su tutti i dispositivi di quella serie, però ha una componente sistematica dovuta alla pista progettata male su tutti i dispositivi.

- Guasti **PERMANENTI**: Il sistema smette di funzionare a seguito del guasto e si mantiene non funzionante per sempre.
- Guasti **TEMPORANEI Transitori**: Questi danni si manifestano, percepisco che il sistema non sta adempiendo alle sue specifiche, ma tipicamente dopo un ciclo di alimentazione, il sistema riparte e di quel guasto apparentemente non c'è più traccia. Sottolineo apparentemente, poiché può essere vero e non. Ad esempio quando si trova la sigla **SEU** (Single Event Upset), indica che il guasto temporaneo è avvenuto a causa tipicamente di radiazioni ionizzanti, cioè radiazioni a cui siamo sottoposti nel mondo. Quindi un SEU porta il sistema in uno stato incognito non funzionante e con un ciclo di alimentazione il tutto riparte.
- Guasti **TEMPORANEI Intermittenti**: di solito questo guasto è innescato da problematiche di tipo termico, cioè il sistema si scalda, non funziona poiché viene meno qualche connessione, poi una volta raffreddato il sistema, questo riprende il normale funzionamento. Questo tipo di guasto è il modo più comune di passare da una situazione di funzionamento intermittente al guasto permanente.

La teoria di analisi che usiamo tende ad affrontare questo tipo di guasto, considerandolo permanente nel tempo.

- Guasti **CATASTROFICO**: quando si ha una brusca e completa perdita di funzionalità.
- Guasti **PARAMETRICI**: quando il guasto ha una deriva continua nel tempo dei suoi parametri.

Sicuramente tutti i sistemi elettronici, soprattutto quelli attivi, sperimentano una situazione di deriva dei parametri (funzionamento dei transistori, variazioni di drogaggi a causa della temperatura, ecc.). Quindi si ha sempre una degradazione dei parametri del sistema, che può portare ad una degradazione *soft* delle specifiche.

Trattazione guasti occasionali permanenti

La nostra trattazione adesso si focalizza sui guasti occasionali, non sistematici. Per ora prendiamo in esame i guasti permanenti. Il problema che affrontiamo è *“come attribuire all'affidabilità $R(t)$ un valore?”*.

Vedremo che normalmente ci sono due strade per muoversi e dare un numero all'affidabilità :

- **relativa ai componenti**: se abbiamo un componente e viene prodotto in grandi quantità, la strategia può essere quella di esaminare una popolazione di questi oggetti e fare degli esperimenti e valutare, con una difficoltà accessoria legata al fatto che l'affidabilità di un componente è elevata, $R(t)$.
- **relativa all'affidabilità del sistema**: attraverso la probabilità che un componente si rompa e con la conoscenza della relazione funzionale di questo componente con il resto del sistema, si calcola l'affidabilità del sistema nel complesso. Così si può capire anche l'influenza del guasto di un componente su tutti il sistema e quindi capire se quel componente è ridondante o meno.

Nella prima categoria vediamo cosa si usa come estimatore:

“in ambito di studi affidabilistici si fa un esperimento tipico, facile da ripetere e che ripetendolo, dà risultati confrontabili, i cui valori possono essere usati come estimatori di grandezze di tipo affidabilistico”.

[vedi anche sugli appunti del Professore]

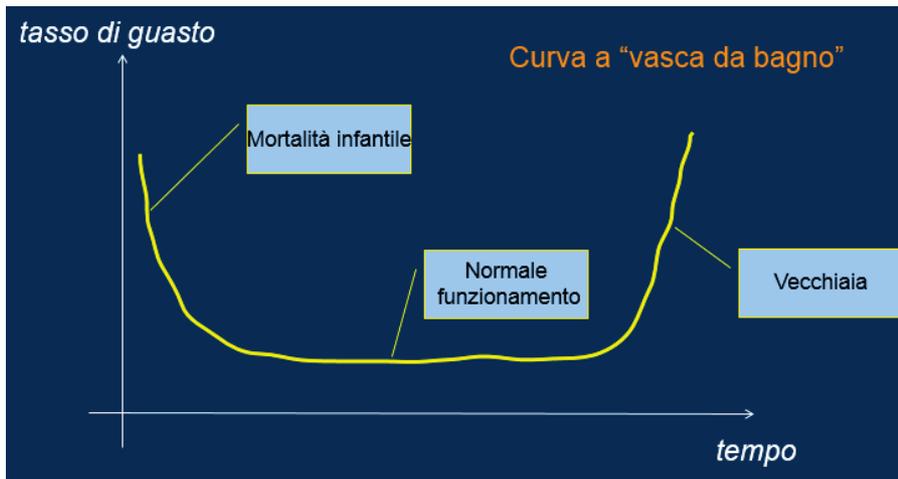
In pratica si prende una popolazione di componenti e si sottopone a test, si fa funzionare ed eventualmente si cerca di ridurre il tempo di test aumentando le situazioni di stress del

componente (pensate che un diodo ha 5000 anni di vita). Perciò si cerca di portare questi tempi proporzionali ai giorni.

Note: non ci basta stressare un componente, ma è essenziale avere un'idea di come il fattore stressante sia in grado di contrarre il tempo. Occorre conoscere quindi il legame tra stress e tempo.

Poi questo lotto di componenti presi a caso si osserva periodicamente con un sistema di log, che è in grado di testarne un qualche parametro. Poi si registra il valore acquisito e il tasso di guasto (una misura relativa che indica quanti se ne guastano del lotto, ad esempio 3 su 1000, poi 5 su 997 ecc).

Questo tipo di esperimenti dà un risultato di questo tipo (come in demografia):



dove la vecchiaia indica un incremento notevole del tasso di guasto dovuto a tutti i fenomeni che nel tempo hanno portato usura e modifiche del sistema dalla situazione iniziale. C'è poi la regione più ampia, dove il tasso di guasto è circa costante ed è quella di interesse al progettista. In pratica in

questa zona ogni tanto si rompe qualche oggetto, però la situazione è legata a casualità (es. incidenti stradali dovuti a non si sa cosa). Proprio perché la situazione è legata a casualità non c'è legame col tempo. Poi c'è una regione di tasso di guasto elevato alla fase iniziale infantile.

Qual è il senso di questo tasso in questa fase iniziale?

È una discontinuità fra quando l'oggetto viene prodotto e poi viene utilizzato: in questa fase vengono fuori tutti i difetti congeniti che potrebbero portare al malfunzionamento o al guasto del componente.

Questa curva è una curva caratteristica per un dato componente prodotto in un certo modo: si chiama CURVA VASCA DA BAGNO data la forma. È il punto di partenza per arrivare ad avere il parametro $R(t)$. Vediamo come la conoscenza di questa curva ci può aiutare a trovare R . Innanzitutto $G(t)$ è dato da:

$$G(t) = \frac{P\{t < \tau < (t + dt) \mid \tau > t\}}{dt}$$

Indica la probabilità (in termine di frequenza relativa) che una certa percentuale dei componenti prodotti si guasti tra t e $t+dt$, dove dt indica il tempo di test sotto stress. Quindi con $G(t)$ noi valutiamo la probabilità che il tempo di vita T appartenga proprio a questo intervallo di osservazione e cioè il dispositivo si guasti durante il test.

$G(t)$ è una velocità ed è legata al periodo di osservazione (ad esempio 3% all'ora): usando il teorema delle probabilità condizionate di BAYES, per cui la probabilità condizionata è uguale al rapporto tra la probabilità congiunta e quella dell'evento condizionante, si può scrivere:

$$G(t) = \frac{P\{t < \tau < (t + dt); \tau > t\}}{dt P\{\tau > t\}}$$

Visto che l'evento condizionante è contenuto nell'evento base, cioè $T > t$ comprende sicuramente la seconda parte dell'evento; allora si può trascurare e usando la distribuzione del tempo di vita si ha

$$G(t) = \frac{F_{\tau}(t + dt) - F_{\tau}(t)}{dt R(t)}$$

Notate che la probabilità che il tempo di vita sia maggiore di t è proprio l'affidabilità $R(t)$ che stavamo cercando. Quindi ammesso di poter considerare il tempo di osservazione un infinitesimo ci troviamo di fronte a un'equazione differenziale a variabili separabili la cui soluzione è facile:

Infatti:

$$G(t) = - \frac{dR(t)}{dt} \frac{1}{R(t)}$$

$$\int_0^t G(x) dx = -\ln R(t)$$

$$R(t) = e^{-\int_0^t G(x) dx}$$

Ragioniamo sulla componentistica che usiamo noi e vediamo se ci interessa tutta la curva: il nostro componente ci interessa nella regione di normale funzionamento. Quando si progetta ci fa piacere trattare tutta la teoria dell'affidabilità considerando che il tempo di vecchiaia sarà molto maggiore del tempo di missione. Quindi quello che ci interessa è che la parte in cui insorge la vecchiaia sia già molto maggiore del tempo di missione e poi è interessante l'altezza della curva nella zona operativa e viene chiamata " λ ".

Quindi se trascuriamo la mortalità infantile e restringiamo l'analisi alla zona di funzionamento costante, avremo un'altra soluzione, ovvero un'affidabilità esponenziale dei componenti e riguarda l'insorgenza di difetti casuali e imprevedibili e non controllabili.

Con tasso di guasto costante cioè al centro della vasca da bagno circa, ovvero ciò che ci interessa a noi:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

In questa ipotesi, derivando R si ottiene la densità, e poi si riesce ad ottenere il MTF:

$$MTF = \int_0^{\infty} \lambda t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$$

cioè tempo medio di vita ed è $1/\lambda$.

Quindi è interessante vedere che si fa l'esperimento, e poi invertendo λ abbiamo MTF.

ATTENZIONE: un dispositivo può avere un MTF di 1000 anni, ma poi la vecchiaia può insorgere a 200, quindi un MTF calcolato con certe ipotesi ci dà un valore numerico che sarà utile per fare dei conti, ma che è applicabile per un tempo inferiore alla vecchiaia. Quindi è un numero che usiamo poiché ci dice, nell'ipotesi che il componente rimanga in una regione operativa di vita normale, la sua probabilità di guasto giustifica un'età media elevata.

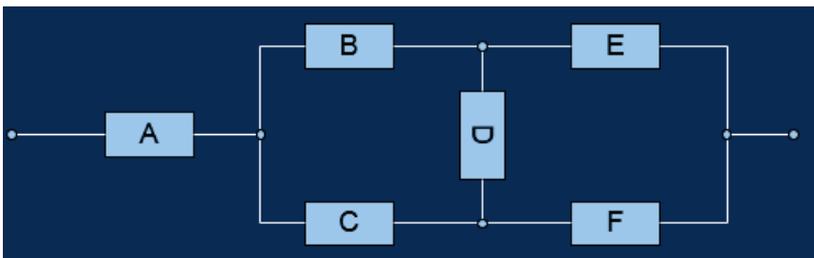
Ovviamente il risultato ottenuto comunque è utile: infatti se abbiamo tanti componenti con affidabilità anche elevatissima, ma che interagiscono tra di loro in modo funzionale serie, (in modo che se se ne rompe uno poi si rompe il tutto), vedremo che la ripercussione sull'affidabilità del sistema è di tipo moltiplicativo.

NOTA: Ha senso considerare questi MTF enormi ricordando poi di valutare le connessioni e le interazioni tra i componenti, quindi useremo questi numeri sempre nella regione di normale funzionamento operativo, valuteremo soprattutto affidabilità complessive, ricordandoci che il risultato ha senso solo se ci limitiamo a tempi inferiori della vecchiaia.

E la zona iniziale?

Rispetto alla zona operativa normale l'abbiamo trascurata. Chiaramente questo incremento della possibilità di guasto nella fase iniziale, potrebbe essere seccante per alcune applicazioni (es. automobile e i primi tagliandi che manifestano difetti congeniti). Ovviamente con un dispositivo per il cuore o un satellite non si possono effettuare riparazioni sui danni congeniti. Per evitare questo problema i sistemi prima di andare nella sede operativa, subiscono una fase di funzionamento in sede di produzione: ce lo danno usato in pratica, dopo una fase di **BURN-IN**: si usa una quantità di tempo limitata che serve a escludere casi di guasto congeniti.

MODELLO DI CONNESSIONE FUNZIONALE



[vedi anche sugli appunti del Professore]

Ci rimane da impostare una metodologia d'analisi in un sistema composto da tanti componenti: se la nostra progettazione ha un certo target affidabilistico è ragionevole, ma non banale, capire come perseguire questo target.

Oggi anche in applicazioni industriali ci si inizia a porre il problema di come calcolare la $R(t)$ di un sistema con molti componenti. Questa metodologia è generale, vale sempre e vedremo i suoi limiti. Quello che serve è l'MTF di ogni singolo componente dal suo produttore. A,B,C,D,F,E hanno la loro statistica. Poi serve stabilire la connessione funzionale, cioè come i sistemi sono legati e interagiscono per dare vita alla funzionalità richiesta del sistema. Normalmente la strategia più diffusa per capire il legame funzionale è legata ai bipoli elettrici. Si associa a un componente un Corto circuito se è sano o un circuito aperto se è guasto. Poi per far capire come sono interdipendenti i vari sistemi, si crea un bipolo che corrisponde al sistema complessivo in cui ogni elemento dà il suo contributo alla continuità fra gli estremi del bipolo-sistema.

In questo modo possiamo individuare situazioni come quella di A, la cui funzione è necessaria al sistema complessivo, oppure situazioni più complesse, dove la funzionalità complessiva può essere garantita da diverse combinazioni alternative di componenti funzionali.

Ogni percorso che collega IN e OUT indica una possibilità di raggiungere la funzione finale. Le due principali modalità di funzionamento, che non esauriscono le interconnessioni funzionali, sono:

- **modalità serie** : quando danno continuità se entrambi i bipoli sono continui
- **modalità parallela** : elementi ridondanti che possono svolgere la funzione principale, ciascuno dei due garantisce la continuità del sistema
In quest'ultimo caso la rottura di un elemento del parallelo può anche passare inosservata (Es. reni e polmoni hanno una ridondanza piena naturale: ne abbiamo 2 ma ognuno da solo basta per l'organismo).

In questi due casi particolari siamo in grado di fare il conto di $R(t)$.

Nel caso più complesso? Se il legame funzionale non fosse in serie o parallelo tra i componenti del sistema? Come si gestiscono le configurazioni funzionali più fantasiose?

L'algoritmo che si propone è il seguente e prevede un esame tabellare esaustivo:

si può immaginare una tabella di verità dove ogni riga indica lo stato di ogni sottosistema del sistema complessivo. Dopo di che non è difficile trovare un algoritmo, dati gli stati dei singoli sottosistemi, che verifica il collegamento tra il nodo di A (destro) e l'uscita.

Si usa un algoritmo di *tracing* semplice e veloce che richiede un numero di passi uguale al numero di nodi del circuito. A questo punto abbiamo una funzione che ci dice quando il sistema funziona dove ci sono gli 1. Se troviamo la probabilità di tutte le righe che hanno 1 e le sommiamo (visto che gli eventi sono esclusivi tra loro) otteniamo l'affidabilità del sistema, cioè la probabilità che ci sia almeno un percorso funzionante tra IN e OUT.

Come si trova la P di una riga?

Immaginiamo che abbiamo una riga attiva B,D,F. La sua probabilità P si ottiene moltiplicando R_b, R_d, R_f e $1-R_c$ e $1-R_e$.

L'algoritmo è semplice però ha un problema: è non polinomiale, cioè il passaggio critico è quello legato alla considerazione tabellare esaustiva che genera 2^n casi degli n sistemi. Quindi ha un limite pratico, questo algoritmo, per una trentina di componenti. Poi questo vale per collegamenti

strani, ma nella maggior parte dei casi un sistema è composto da sottosistemi collegati in serie (affinchè un sistema funzioni devono funzionare tutte le sue parti).

Aspetti particolari dell'affidabilità

Adesso affrontiamo alcuni aspetti che meritano di essere osservati. Fino ad ora abbiamo visto la teoria dell'affidabilità, la nomenclatura, il modo con cui si attribuisce l'affidabilità di un sistema e come si può calcolare. In tutto ciò c'è un unico spunto che ci dà l'idea su come migliorare l'affidabilità di un sistema, ovvero un sistema basato su elementi parallelo, cioè inserendo dei criteri di ridondanza possiamo migliorare l'affidabilità del sistema. Nella pratica non è così facile: in alcuni casi semplici va bene, ad esempio sui pullman sia luci di posizioni che stop sono doppi, quindi la funzione prevista viene svolta anche se si rompe una lampadina. Ci sono casi invece dove un approccio di questo tipo non va bene, soprattutto nell'elettronica. Nella progettazione elettronica, per ottenere livelli di affidabilità, ci sono vari punti chiave da tenere presente. Il più banale si può esprimere dicendo che per potere attribuire ad un sistema elettronico delle capacità di maggiore affidabilità, occorre sapere valutare se il sistema funziona o meno. Quindi una peculiarità dei sistemi elettronici integrati è che la risposta a questa domanda non è immediata, soprattutto se ci sono guasti occasionali di produzione.

Come si capisce allora se un processore funziona o no?

Anche se notiamo che una parte di un software funziona, non possiamo essere sicuri che funziona tutto il processore. Da qui si capisce che un GROSSO problema dei circuiti integrati è la **collaudabilità dei circuiti**. Infatti per questo motivo i produttori d'elettronica sono disposti a spendere fino al 10% delle risorse disponibili per rispondere a questa domanda: ciò vuol dire che nei chip ci sono dei circuiti addizionali, che hanno l'unico scopo di poter testare il circuito stesso. Ad esempio negli Xmega ci sono 4 pin (circa il 10% di 44 pin) che si utilizzano come interfaccia di collaudo JTAG. Collaudare un sistema elettronico digitale si basa sui concetti di:

- **Controllabilità:** essere in grado di pilotare il circuito in modo da far venire 0 e 1 su tutti i nodi del circuito dove vogliamo
- **Osservabilità:** fare in modo che una difformità dal valore impostato dia un effetto visibile dall'esterno

Quindi noi diamo dei pattern di valori di ingresso e poi verifichiamo l'effetto visibile fuori per rilevare eventuali problemi.

Ovviamente la collaudabilità presuppone un collaudatore, che valuta l'affidabilità del sistema con delle macchine apposite.

Nella vita operativa come si fa a pensare delle funzionalità diagnostiche anche in un secondo momento, successivo alla produzione e vendita del prodotto?

Qui nasce la necessità di avere una **capacità di autodiagnosi**. Prima ancora però dell'autodiagnosi occorre valutare le capacità di **self testing** di un sistema elettronico.

Un esempio tipico di self testing si vede quando si accende il pc e al boot si vedono tutte le init() che verificano, cioè fanno una diagnosi delle periferiche di sistema al lancio del sistema operativo. Ovviamente il self test ha un costo poiché ci vuole tutta una circuitistica apposita per questa funzione. Inoltre il costo derivante da questa funzionalità, oltre che monetario è relativo alla memoria necessaria per immagazzinare i pattern di stimolo del sistema e quelli di confronto, che servono per valutare l'esito del test (MB di dati).

Nota: Non è pensabile mettere tutto questo su un singolo componente.

Come si fa allora a fare dei self-test o un'autodiagnosi?

Le soluzioni sono diverse e ingegnose: una soluzione particolarmente furba è quella di usare dei generatori pseudorandomici in modo tale da creare delle sequenze pseudorandom, poiché la casualità dà una certa garanzia che vengano stimulate tutte le sezioni di una rete digitale. Ovviamente queste sequenze, essendo

PSEUDO-random, possono essere ripetute e quindi sappiamo effettivamente quale sequenza viene inviata come stimolo al sistema. Poi dopo avere inviato lo stimolo si usa lo stesso generatore pseudo random con un feedback legato alle uscite, studiando il tutto in modo che il cambiamento di un bit all'uscita provoca un cambiamento del valore complessivo del contatore, un risultato finale diverso.

L'autodiagnosi è ancora un qualcosa di più avanzato: infatti il self-test si fa all'avvio di un sistema, oppure è l'utente che interrompe il normale funzionamento del sistema e fa partire il test; mentre l'autodiagnosi funziona contemporaneamente al comportamento operativo del sistema.

Questo è tipico delle centraline di controllo dei motori oppure in campo medicale e si ottiene con una ridondanza funzionale non del 100%: ad esempio c'è un microcontrollore che fa il test su un microcontrollore principale che gestisce il sistema. In questo modo è stesso il sistema che valuta il suo corretto funzionamento o meno. Un altro step da valutare è relativo ad avere un sistema che sa se sta funzionando bene o no, ma sa anche adattarsi ai problemi e riesce a prendere dei provvedimenti in caso di guasto. In particolare se viene riconosciuta una condizione di guasto, il sistema si pone esso stesso in una condizione di fault safe, cioè una condizione di guasto riconosciuta: ad esempio se un semaforo riconosce un problema, autonomamente più porsi nella condizione di giallo lampeggiante o spento.

Un'altra strategia invece consente al sistema, un volta rilevato un guasto, di ridurre le proprie specifiche: ad esempio un sistema di trazione di un motore può ridurre la potenza d'uscita e funzionare a potenze più ridotte.

La strategia Top di gamma è la **fault tolerance**: prevede interventi correttivi che mantengono la funzione piena in presenza di guasto e sono strategie caratteristiche di sistemi difficilmente accessibili.

> Affidabilità dei sistemi

- Generalmente l'analisi dei sistemi dal punto di vista dell'affidabilità (capacità di svolgere una determinata funzione) è legata a considerazioni

> tecniche

quando è messo in gioco lo stesso possibilità di funzionamento, come nel caso del calcolatore a valvole.

> economiche

perché il mancato funzionamento si può sempre associare a un costo, come pure ogni collaudo o verifica

- Nel caso di sistemi biomedici destinati a svolgere funzioni per il sostentamento della vita, a questi motivi se ne aggiungono altri di carattere etico e giuridico che entrano a far parte della responsabilità del progettista (vedi scritte sui manuali riguardo alle funzioni life-support).

- Per parlare di affidabilità occorre capire che cosa è il fenomeno che limita la capacità di svolgere una funzione: il guasto

- Ogni difformità del comportamento del sistema e del valore dei suoi parametri da quanto stabilito dalle specifiche si può chiamare GUASTO.

- Esiste una vasta possibilità di classificazione dei guasti, in funzione del modo, delle cause, delle modalità di insorgenza - in particolare si dicono

- | | | |
|-----------|---|--|
| ①
modo | } | PARAMETRICI: degradazione soft delle specifiche
qualche valore esce dalle tolleranze previste
del progetto |
| | | CATASTROFICI: la funzione non viene svolta affatto |

la distinzione può sempre in teoria sottile
Quando è rotta una resistenza da 1kΩ 5% ?

0Ω — 500Ω — 100Ω — 1500Ω — 0Ω

②
perenni

SISTEMATICI: si presentano in tutti gli esemplari 21.1b del sistema; praticamente errori di progetto (hw, sw) sfuggiti alla fase di Debug.

OCCASIONALI: Presenti in una particolare realizzazione, sono dovuti al processo di realizzazione o agli stress durante la vita operativa.

in 2029
③

PERMANENTI: le questo c'è e ci resta

TEMPORANEI — TRANSITORI: indotti da particolari e anomale condizioni operative, scompare senza lasciare tracce (!!?)

INTERMITTENTI: vanno e vengono in modo casuale - generalmente evidenziano una criticità del progetto o una transizione verso il guasto permanente.

• Occorre poi tradurre il problema in termini quantitativi, per poter eseguire analisi e adottare strategie corrette di progetto. L'approccio è di tipo STATISTICO.

> Viene definita una variabile aleatoria e le sue principali statistiche

τ : tempo di vita

$y_{\tau}(t)$: densità di probabilità

$Y_{\tau}(t)$: distribuzione

$E\{\tau\}$: aspettazione di vita o

MTF (tempo medio al guasto)

MTBF (tempo medio tra guasti, per sistemi ripristinabili)

> In particolare si definisce

$R(t)$: affidabilità, probabilità di un tempo di vita superiore a t . (tempo di missione)

Si ha

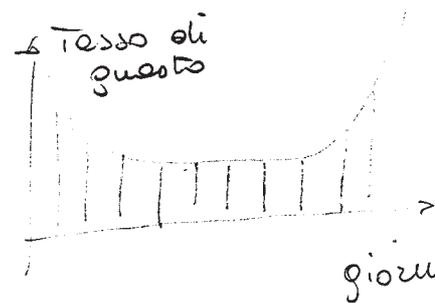
$$R(t) = \int_t^{\infty} y_{\tau}(t) dt = 1 - Y(t)$$

• Come si vede si tratta di parametri probabilistici, 21.2
 che possono essere desunti con metodi statistici da
 esperimenti reali.

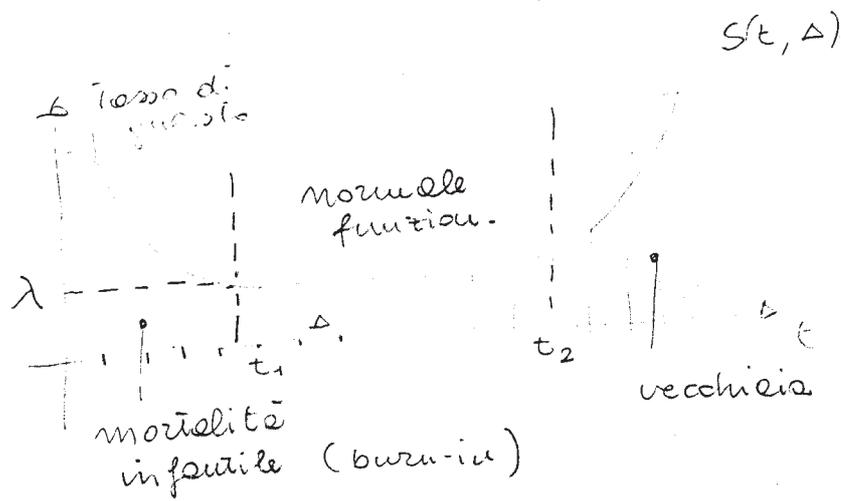
- > Un esperimento che per sistemi complessi e articolati
 porta a un risultato caratteristico è il seguente:
- si individua una popolazione di numerosi esemplari
 di un certo sistema
 - si controlla nel tempo il numero di quelli che
 si rompono e di quanti continuano a funzionare
 - si riporta il numero di sistemi rotti in un
 certo periodo con il totale dei funzionanti
 all'inizio del periodo.

Esempio

Giorno	Funzion	Guasti	Tasso di guasto
1	100	0	~
2	80	20	20%
3	70	10	12.5%
4	65	5	7.14%
5	61	4	6.15%
6	57	4	6.56%
7	53	3	5.26%
8	50	3	5.66%
9	47	3	6%
10	44	3	6.38%
11	41	2	4.55%
12	39	3	7.32%
13	36	6	15.4%
14	30	10	27.8%
15	20	15	50%
16	5	5	~



- Queste osservazioni danno origine a una
 curva caratteristica, detta a VASCA da BAGNO
 dove si riconoscono tre regioni



- L'individuazione di questa curva con la valutazione di t_1 , t_2 e soprattutto λ può dare indicazioni sui valori dei parametri probabilistici
 - > Questo è alla base di ogni procedimento statistico, che opera attraverso meccanismi di coerenza interna. I parametri probabilistici "stimati" ci permettono di risalire al grado di probabilità di una certa osservazione che viene detto "grado di confidenza".
 - > Nel nostro caso, cosa indica $\Delta S(t, \Delta)$? Può essere considerato uno "stimatore" dell'evento { questo in $t, t+\Delta$ | dato che in t il dispositivo Ok } la probabilità di questo evento si può scrivere come

$$\frac{Y_c(t+\Delta) - Y_c(t)}{1 - Y_c(t)} = \Delta S(t, \Delta)$$

se l'intervallo Δ è sufficientemente piccolo si può scrivere

$$S(t) = \frac{1}{R(t)} \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{Y_c(t+\Delta) - Y_c(t)}{\Delta} = - \frac{R'(t)}{R(t)}$$

- la conoscenza della curva a vesce, nel tratto di normale funzionamento, ci dice che $S(t)$ è costante per cui possiamo risolvere l'equazione differenziale.

• Si ha

$$\lambda = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt}$$

$$\frac{dR(t)}{dt} + \lambda R(t) = 0 \quad \text{omogenea. Da cui}$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad \text{per } t \geq 0 \quad \text{e } 1 \text{ altrove}$$

dovendo essere $R(0) = 1$ per ogni motivo.

• Immediatamente, in queste ipotesi, si ha

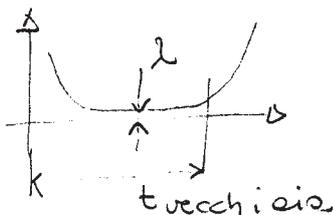
$$\left. \begin{aligned} Y_2(t) &= 1 - e^{-\lambda t} \\ Y_3(t) &= \lambda e^{-\lambda t} \end{aligned} \right\} \text{ per } t \geq 0 \quad \text{e } 0 \text{ altrove}$$

• Interessante valutare l'aspettativa di vita o MTF

$$\begin{aligned} E\{x\} &= \int_0^{\infty} x Y_2(x) dx = \lambda \int_0^{\infty} x e^{-\lambda x} dx = \quad \text{per parti} \\ &= \lambda \left\{ -\frac{x e^{-\lambda x}}{\lambda} \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} \frac{e^{-\lambda x}}{\lambda} dx \right\} = \frac{1}{\lambda} \end{aligned}$$

• È importante ricordare sempre che questo risultato vale solo per il normale funzionamento, quando il tasso di questo è costante (cioè per $t < t_{vecchiaia}$) -

Può accadere che $MTF > t_{vecchiaia}$: significa solamente che ci sarà un bassissimo numero di questi accidentali prima del periodo di degenerazione finale



Osservazione: l'aspettativa di vita non mi dice che senz'altro il tale sistema vivrà MTF anni. Infatti

$$R\left(\frac{1}{\lambda}\right) = e^{-1} \quad 36.8\%$$

PS: quando si dice che l'uomo ha una aspettativa di vita di 76 anni, si fa riferimento a una $R(t)$ che **COMPRENDE** il fenomeno della vecchiaia (sarebbe

- Valutazione dell' MTF di sistemi complessi, ottenuti combinando sottosistemi di cui si è nota l'affidabilità.

> Sistema SERIE: la rottura di un pezzo blocca tutto

$$P\{t > t_0\} = P\{t_1 > t_0 \text{ e } t_2 > t_0\} = R_1(t) \cdot R_2(t) \quad \text{se indipendenti}$$

Caso esponenziale

$$R(t) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}$$

$$MTF = \frac{1}{\frac{1}{MTF_1} + \frac{1}{MTF_2}} \quad (\text{formula del //})$$

> Sistema PARALLELO: un pezzo rotto può essere rimpiazzato da un altro che ne svolge la funzione

$$P\{t > t_0\} = 1 - P\{t_1 < t_0 \text{ e } t_2 < t_0\} = 1 - Y_1(t) Y_2(t) = R_1 + R_2 - R_1 R_2$$

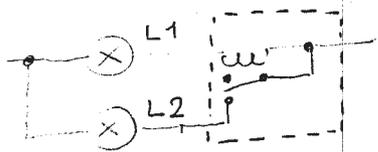
Caso esponenziale

$$R(t) = e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}$$

$$MTF = MTF_1 + MTF_2 - \frac{1}{\frac{1}{MTF_1} + \frac{1}{MTF_2}}$$

è senz'altro maggiore di ciascuna delle due

Es:



Se L1 brucia, L2 viene inserita dal relè (e la cui affidabilità si considera >>)

> Sistemi misti più complessi: le modalità di auto-riconfigurazione possono essere più complesse e non direttamente assimilabili a serie e parallelo. Occorre ricostruire la statistica del tempo di vita globale

Componenti indipendenti				Esito
1	2	3	4	
OK	OK	OK	OK	OK
OK	OK	OK	-	OK
OK	OK	-	OK	-

Gli eventi sono disgiunti e le relative probabilità note.

• Per i grossi sistemi disgiustici (non di supporto alla vita) si può costruire una teoria analoga che però tenga conto delle possibilità di riparazione.

Si ha così la variabile duale

τ_r : Tempo di riparazione (in cui il sistema resta guasto.)

$m_0(t)$: densità

$M_0(t)$: distribuzione (manutenibilità)

> Lo studio delle statistiche di τ e τ_r permette di valutare la DISPONIBILITÀ di una grande apparecchiatura e impostare efficaci strategie per la manutenzione.

• Progettazione per l'affidabilità. (anni)

Non è affatto banale progettare sistemi che siano affidabili - Soprattutto l'affidabilità non è quel cosa che si attacca dopo all'oggetto finito. Riguarda tutta la vita del sistema

> Progettazione

> Produzione (es: ISO 9000)

Qualità: controllo completo di tutto il processo produttivo
definizione delle procedure
considerazione del fattore umano
rilevamento costante dei parametri di qualità

• Torniamo alla progettazione.

Esistono diverse filosofie, non in alternativa, per affrontare questo tema.

> Migliorare la collaudabilità

È un passo ineludibile - Qualsiasi strategia per avere sistemi affidabili prevede una fase di DIAGNOSI.
Si migliora la collaudabilità di un sistema per due vie

- Migliorare controllabilità e osservabilità dei singoli sottosistemi

□ Partizionamento in estroblocchi fisicamente individuabili e accessibili

□ ITAG e simili

- Aggiungere direttamente sul sistema ulteriore HW+SW con l'unico scopo di eseguire test di funzionamenti (built-in testing)

- Fase iniziale del boot di ogni calcolatore
- Verifica dei fine corso e di ogni elemento dotato di feedback attuatore-sensore.

> Capacità di autodiagnosi (self-checking)

Il successivo passo prevede la capacità del sistema di autoverificare il corretto comportamento DURANTE il normale modo operativo.

Questa capacità si può ottenere

- Con un'abbondante "inverramento" del sistema con sensori che verifichino la congruenza dello stato del sistema con quanto impostato
- Con l'uso di codifiche per l'informazione nel sistema ridondanti e "preservate" delle operazioni eseguite dagli elaboratori previsti (CRC, parità) e dei checker.

> Possibilità di indirizzare il sistema questo verso un comportamento di "minimo danno" (fail-safe)

- Per esempio, un interruttore si può rompere in due modi: non fa più contatto ^① i contatti si incollano e vanno in corto ^②
- L'ipotesi ① è considerata più "safe" della ② e orienta le tecniche costruttive di interruttori e relè.

> Realizzazione di sistemi tolleranti i guasti.

Tali sistemi riescono a compiere la loro missione anche in presenza di uno o più guasti. Perché ciò sia possibile il sistema deve

- Avere capacità di autodiagnosi
- Avere possibilità di autoconfigurarsi (ridondanza hardware)
- Avere possibilità di autocorreggersi (ridondanza nei codici e nel software)

Si può pensare anche a "graceful degradation..."

MIGLIORARE LA COLLAUDABILITA'

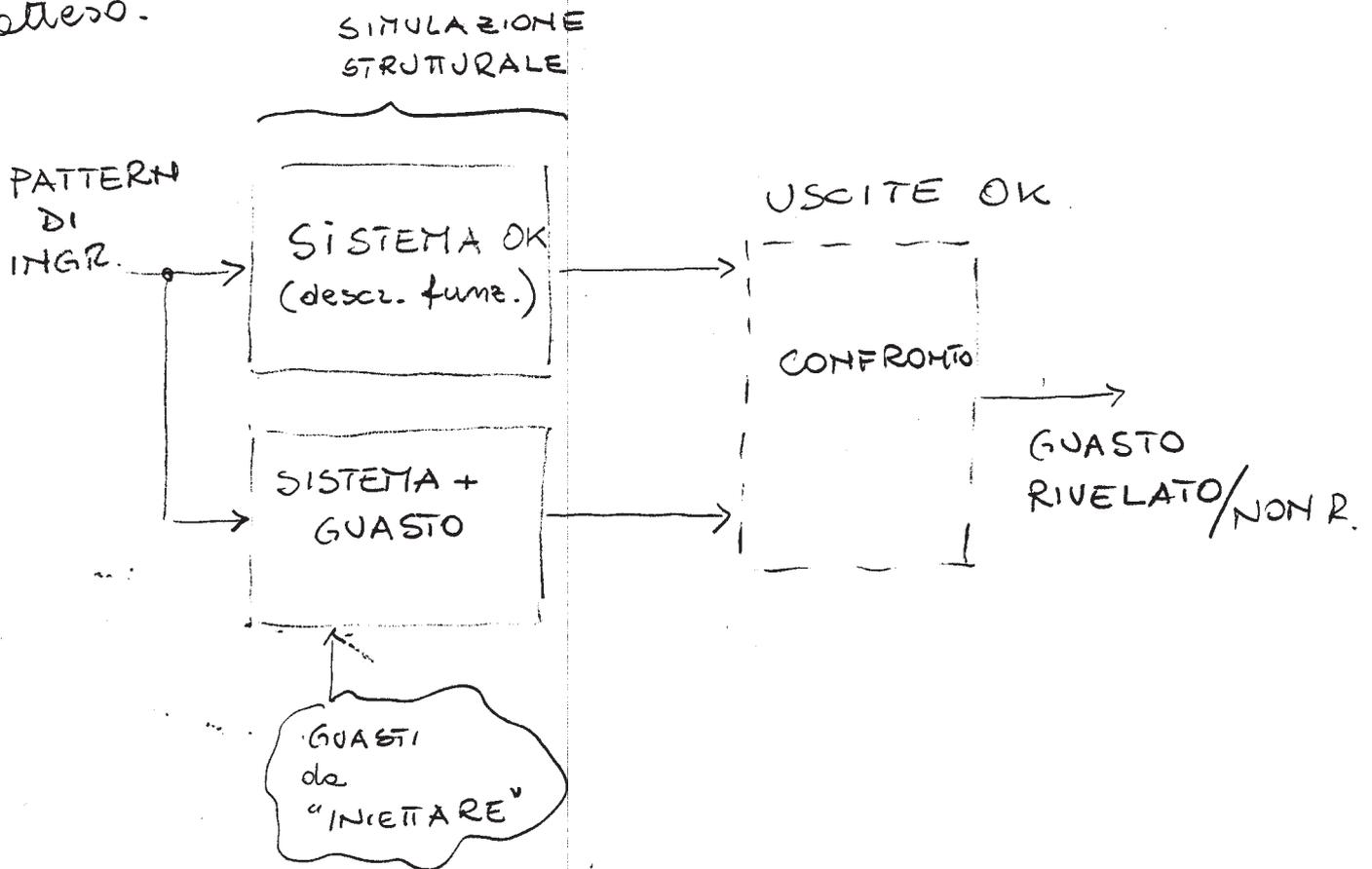
2 1.5

> Concetto di MODELLO di questo

→ Per poter trattare il collaudo in modo rigoroso, occorre avere un modello preciso del questo che permetta di predirne gli effetti sul sistema.

→ La presenza di un questo (di ogni questo potenziale) deve poter essere descritte in modo formale e date in pasto a un SIMULATORE.

→ Rivelare un questo vuol dire dare una sequenza di ingressi (opportune) e osservare in uscita un comportamento diverso da quello atteso.



→ Esempio dei circuiti digitali: modello di questo logico "STUCK AT" (LINEA FISSA)

10

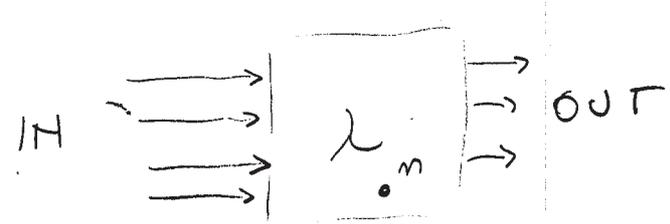
• Vantaggi -

- 1) Date la descrizione strutturale di un circuito, l'insieme dei questi è ben definito e limitato
- 2) Uno stuck non può creare effetto memoria (cioè una rete COMBINATORIA non può diventare SEQUENZIALE)

• Svantaggi

Non è molto aderente alla realtà fisica degli odierni circuiti CMOS

> OSSERVABILITÀ e CONTROLLABILITÀ in reti combinet.



$$OUT = \lambda(IN)$$

↑ SINGOLO GUASTO m stuck o \emptyset

* è controllabile se $\exists IN \Rightarrow (m=1)$ insieme $IN_{m=1}$

la controllabilità sarà $\frac{IN(m=1)}{IN \text{ totali}}$

* Se stacchiamo m da tutte le porte che esso pilota e forniamo questo valore dall'esterno abbiamo

$$OUT' = \lambda_m(IN, m)$$

sono:

$$OUT = m \lambda_m(IN, 1) + \bar{m} \lambda_m(IN, 0)$$

È osservabile se $\exists IN \Rightarrow$

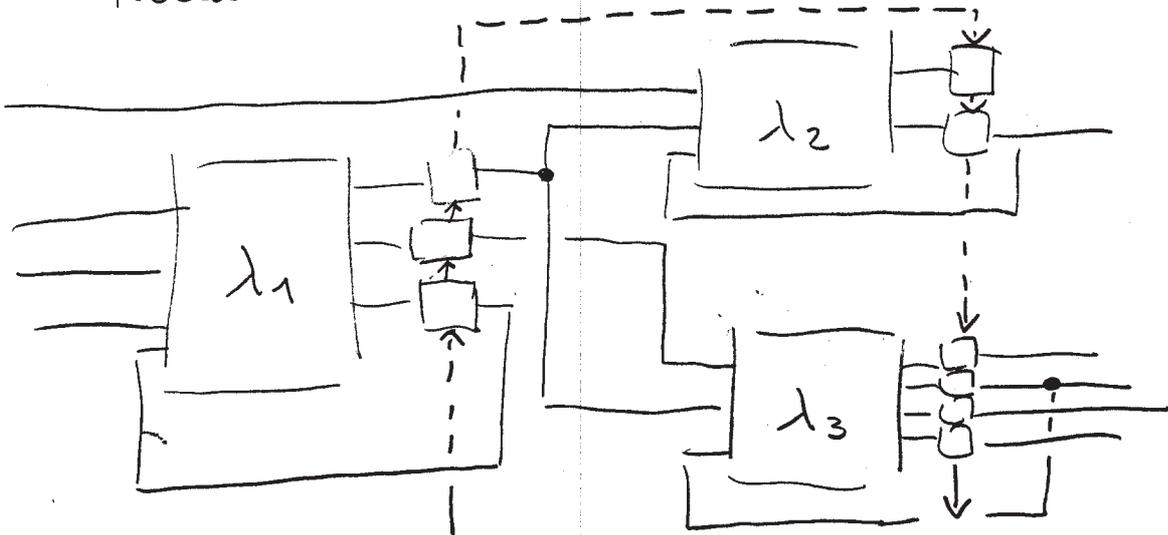
$$\lambda_m(IN, 1) \neq \lambda_m(IN, 0)$$

→ Per RIVELARE occorrono entrambe le condizioni.

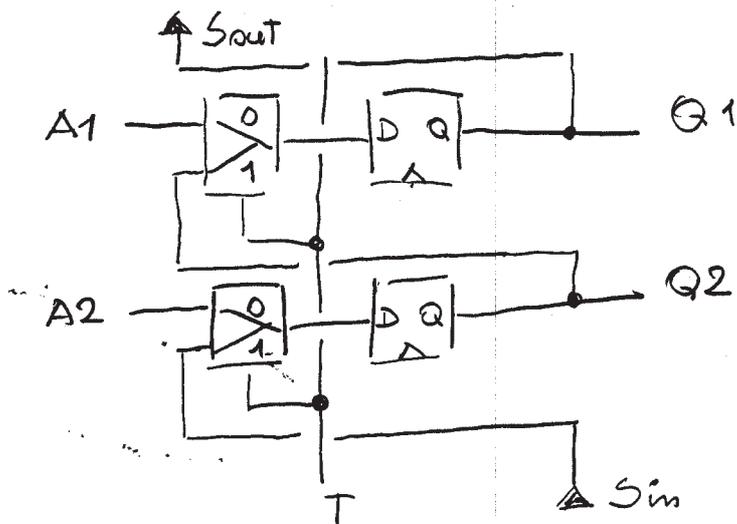
> Come collegare reti SEQUENZIALI

- Occorre avere accesso allo STATO della macchina
- Interrompere lunghi contatori
- Il concetto di scan-paths

Modello di macchina sequenziale



TUTTI i registri che contengono lo stato interno hanno un collegamento ausiliario (pilotato da un ingresso indipendente T) che li fa diventare un UNICO SHIFT-REGISTER



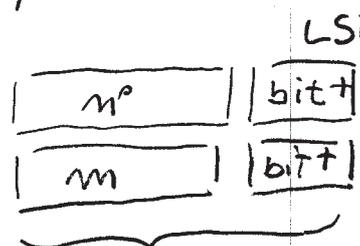
Il collegando così può essere riportato a quello dello shift + 3 reti combinatorie



> Altri esempi di BUILT-IN testing

- Presenza di generatori di segnali di prova per la verifica di interi sistemi di misura
- Programmi diagnostici
- Coerenza tra più sistemi collegati alla stessa grandezza
 Es: sistema sensore di posizione accurato (anal.) + rivelatori di Ø e fine corsa
- Sistemi in grado di eseguire DUMP in caso di eccezioni
 Es: praticamente tutti i DSP delle ultime generazioni

- Uso di codifiche con ridondanza "chiuse" rispetto alle operazioni di interesse
 Es: parità rispetto alle operazioni di max/min (bit aggiunti come LSB)



$n \leq m \rightarrow$ eseguite sul numero complessivo danno lo stesso risultato che se lo su n e m .

- prova del "move"



(in binario $2^n - 1$) *

Somma	3847	4
Prodotto	1294	7 ↓
	+ 5141	→ (2)
	× 497,8018	→ (1)

AUTODIAGNOSI

R 1.9

> Cosa ha oltre il built-in
ATTIVA durante il NORMALE Funzionamento
simile al nostro "Mi sento male"

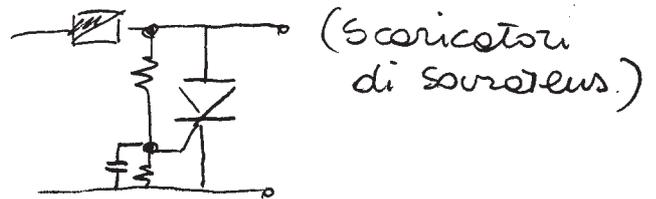
> Esempio dei sistemi con "watchdog":
un sistema INDIPENDENTE osserva il
comportamento del sistema principale e
intende eventuali azioni nel caso
rilevi comportamenti anomali.

> Il concetto di TIME-OUT per i processi che
dovrebbero (se tutto va bene) arrivare a
compiimento in un tempo noto

PACE MAKER

FAIL SAFE esempi

- Fusibile
- Circuiti di crowbar
- Valvole delle caffettiere
(fondano a 110°C)
- Semefori → giallo lampegg.
- Scocche e deformazione progressive



FAULT TOLERANT esempi

R 1.10

- Doppi circuiti frenanti (HW)
- Doppie luci di stop (HW)
- Codici a correzione d'errore (SW)
(dischi o nastri, canali disturbati)

Esempio di codice che rivela e corregge il singolo errore e rivela il doppio in $(m \times m)$ bit utili

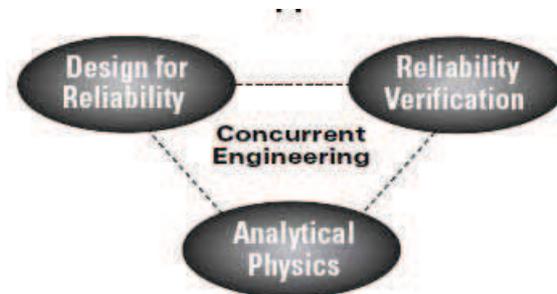
$$\begin{array}{cccc|c} x & x & x & x & 0 \\ x & x & x & x & 0 \\ x & x & x & x & 0 \\ \hline x & x & x & x & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} n \text{ righe} \\ +1 \text{ di parit\`a in verticale} \end{array}$$

m colonne
+1 di parit\`a in orizzontale

- Reni, polmoni
- Doppie lampade nel proiettore ...

Affidabilità: fasi di ingegnerizzazione

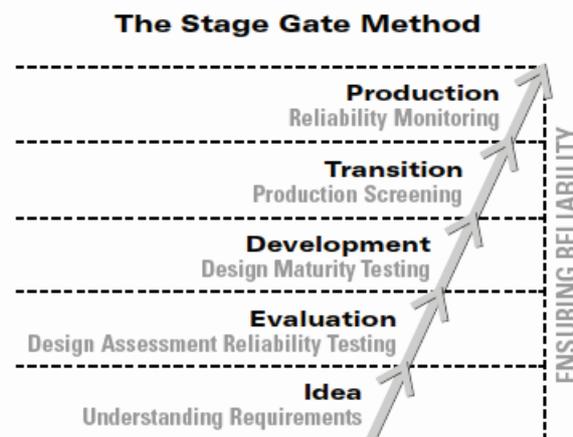
Adesso valuteremo gli aspetti legati al ciclo produttivo e alle fasi di ingegnerizzazione di un certo target affidabilistico. Il problema è il seguente: abbiamo un progetto già ultimato e un target affidabilistico stimato e ottenuto; il sistema ha superato anche il debug, ma iniziando a fare delle stime e valutazioni e ci accorgiamo che le nostre misure di affidabilità, magari eseguite con prove accelerate, non sono soddisfacenti. In questi casi l'approccio tipico non è quello di rivedere il progetto da capo inserendo dei sistemi di autodiagnosi, fault tolerance o simili; si fa un'analisi fisica completa di cosa sta succedendo, quali sono le cause dei guasti e si fanno interventi mirati del ciclo produttivo. Ad esempio se ci accorgiamo che in un sistema salta sempre la stessa saldatura di un condensatore elettrolitico visto che è pesante e subisce di più l'effetto delle vibrazioni, magari si può prevedere che, in sede di montaggio, questo venga fissato alla scheda con una goccia di epossidico. Quindi è un procedimento completamente diverso molto legato all'ingegnerizzazione e ad un ciclo continuo di analisi del prodotto, test affidabilistico e provvedimento correttivo.



Questo è quello che normalmente viene fatto in sede produttiva. Quindi gli aspetti ingegneristici che concorrono al raggiungimento dell'affidabilità sono i 3 nella figura sopra esposta:

- **Design for Reliability** : Capacità di progettare tenendo presente il target affidabilistico
- **Reliability Verification** : La verifica dell'affidabilità tenendo presente quali potranno essere le prove che possono essere eseguite per valutare il target
- **Analytical Physics** : Capacità di analizzare il sistema in presenza di guasto per capire le cause e riuscire ad intervenire

Questo obiettivo viene proposto con una metodologia definita **METODO A STADI**

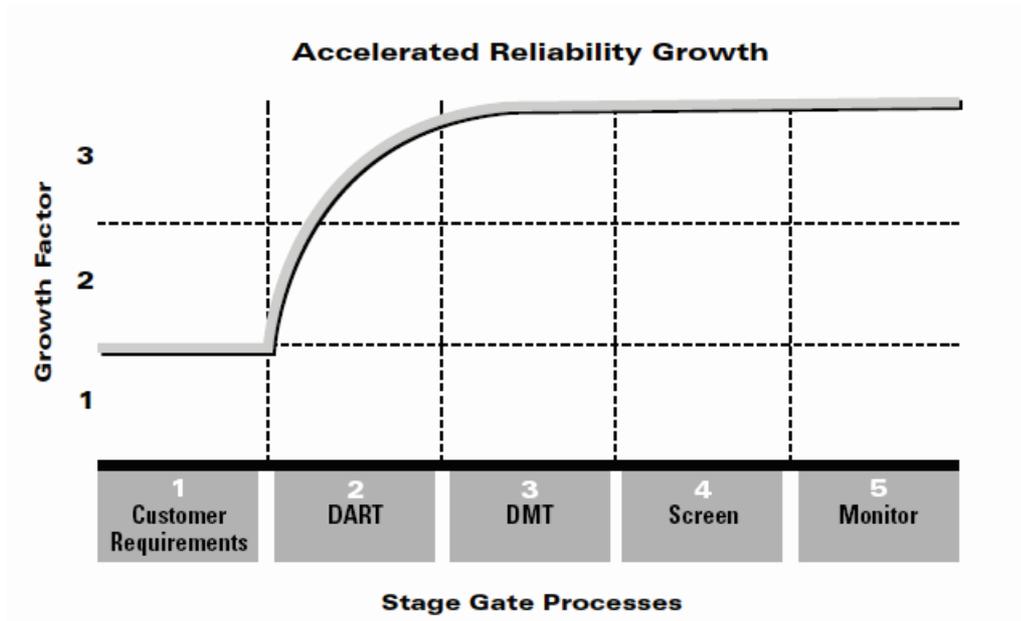


Dove sostanzialmente ci si muove lungo il percorso che porta al conseguimento di una certa affidabilità: andando verso l'alto ci sono le varie fasi della vita del dispositivo e man mano che si percorre questa strada si conseguono obiettivi di affidabilità.

Queste fasi sono:

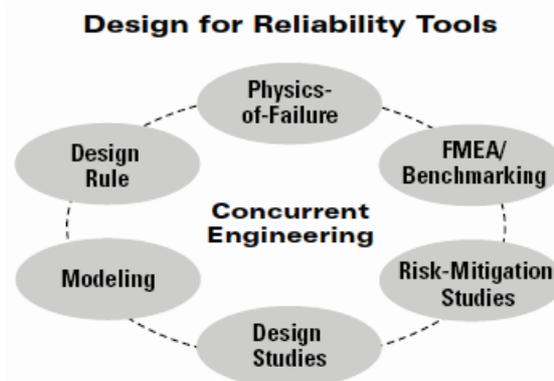
- **Ideazione:** dove si capiscono le specifiche del sistema
- **Valutazione:** con lo stabilire le modalità con cui verrà collaudata l'affidabilità
- **Ingegnerizzazione:** progettazione del sistema e dei test che accompagnano lo sviluppo del sistema
- **Screening:** collaudo prima di arrivare alla produzione, naturalmente non tutti i pezzi vengono collaudati
- **Produzione:** monitoraggio post produzione

Un approccio di questo tipo qui prevede un **fattore di crescita**:



È un andamento applicato all'affidabilità e l'obiettivo è quello di dedicare la fase uno, quello della comprensione delle specifiche, a individuare quali sono gli elementi che determinano il corretto raggiungimento del tempo di missione dell'apparecchio. Poi la fase due **DART (Design Assessment Reliability Test)**, quella delle prove accelerate, si utilizza per ottenere un aumento di affidabilità rispetto al valore iniziale. Per arrivare poi ad un assestamento del valore dell'affidabilità nelle fasi successive: **DMT (Design Maturity Test)** indica appunto la maturità, il consolidamento del progetto. Infine si cerca di mantenere il livello di affidabilità raggiunto mediante tecniche di **screening** e **monitor** del sistema. Per muoversi in questo ambito servono strumenti e metodi, perciò vengono presentati vari tools.

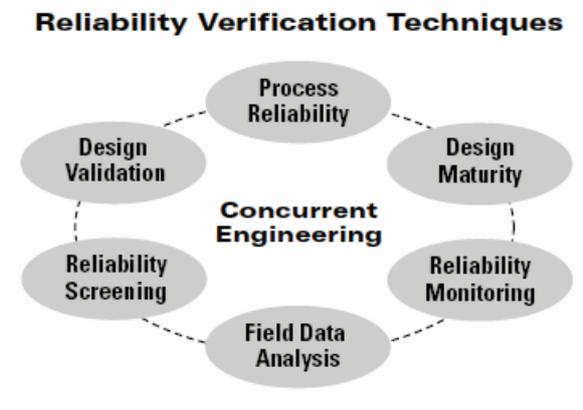
Ora vediamo gli strumenti per la progettazione dell'affidabilità:



L'idea è quella di far concorrere diverse discipline al raggiungimento di un certo obiettivo: qui sono inserite la conoscenza della fisica del guasto, individuazione di regole di progetto, capacità di modellare, analizzare

e studiare il progetto e poi ci sono le specifiche per il discorso affidabilistico e riguardano il FMEA (strumento formalizzato di gestione e analisi dei guasti) abbinato a studi di mitigazione del rischio (studi che hanno come obiettivo quello di ridurre le condizioni che possono portare al guasto).

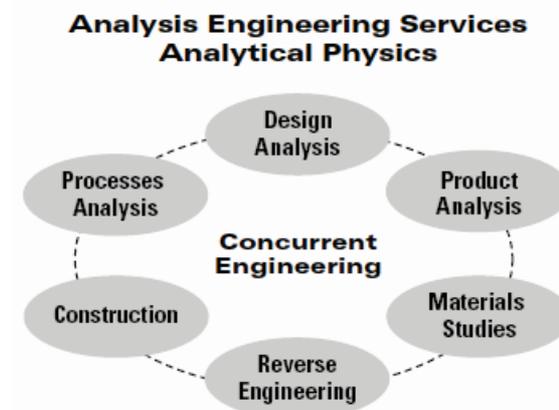
Poi ci sono gli strumenti per la verifica dell'affidabilità:



Come si fa a capire se un certo target di affidabilità è stato conseguito?

Occorre avere tecniche che studino la possibilità di monitorare l'affidabilità, il log dei dati di produzione per fare un'analisi successiva, occorre poter effettuare uno screening di affidabilità (ogni tanto devono essere prelevati dei campioni per eseguire delle design validation). Poi c'è la design maturity che riguarda la corretta gestione del progetto. Notate una cosa interessante: un conto è la reliability dell'oggetto (probabilità che funzioni per il tempo di missione) e un conto è la reliability del processo (capacità di un processo produttivo di mantenere certi parametri produttivi per un certo tempo di produzione).

Poi ci sono un gruppo di discipline che concorrono a fornire servizi di analisi ingegneristica e analisi fisica:



È chiaro che un elemento fondamentale dello studio dell'affidabilità è la capacità di analizzare, in presenza di un guasto, cosa l'ha causato. Design e Product analysis sono fasi tipiche che caratterizzano le aziende (Es. un'azienda contatta un centro di ricerca per analizzare il progetto) e sono elementi di valutazione del sistema e del processo produttivo con cui si è realizzato il sistema (oggetto). Ovviamente poi vengono coinvolte discipline di tipo industriale chimico fisiche per analizzare e studiare i materiali utilizzati e poi si fa il Reverse engineering dell'oggetto prodotto da noi stesso: da un'analisi del prodotto si cerca di capire quali sono state le scelte progettuali e il processo di produzione.

Il problema nella prima fase dello studio è quello di capire quali sono i requisiti di affidabilità che dovrà avere l'oggetto che stiamo producendo e soprattutto come devono essere formalizzati:

Specified and Unspecified Requirements

- ✓ How can the customer cause misuse?
- ✓ What are the life hazard conditions?
- ✓ What is the service life?
- ✓ What are the reliability goals?
- ✓ What are the costs associated with the goal?
- ✓ What is the customer's use plan?

Quand'è che saremo soddisfatti in termini affidabilistico?

Sopra vengono riportate una serie di domande guida legate al tempo di vita del dispositivo. In teoria si potrebbe partire dalla terza, cioè qual è il tempo di missione, per quanto tempo ci aspettiamo che lavori quest'oggetto? È una domanda che sembrerebbe banale e a cui un ingegnere tenderebbe a rispondere: "Per sempre!", però nulla è per sempre. Nel mondo della produzione degli oggetti il "per sempre" non esiste per 2 motivi:

1. Il consumismo è la molla che tiene in vita la possibilità di produrre le cose, anche se tutti lo contestano. La nokia dopo la produzione del 3310 rischiava di fallire poiché, avendone venduti milioni, ha organizzato un ciclo produttivo con una capacità produttiva enorme e questo apparato industriale, una volta saturato il mercato, non produceva più ricavi. La cosa che ha fatto riprendere la produzione è stata l'introduzione della videocamera sui cellulari, per cui le persone hanno iniziato a comprare nuovi telefoni anche se in realtà non ne avevano bisogno. Quindi è evidente come il consumismo serva per mantenere in vita l'attività produttiva delle aziende. Occorre pensare ad un ciclo di vita di un oggetto in ambito industriale, poiché a seguito di una scelta di questo genere poi si adeguerà l'apparato aziendale di produzione.
2. Lo smaltimento dei rifiuti è un tema sensibile: le cose che produciamo adesso poi ce le troveremo come spazzatura nei giorni futuri, quindi è utile pensare ad un ciclo di vita di un oggetto che non si conclude con la vendita dell'oggetto, ma con il ritiro da parte dell'azienda produttrice per riciclare e smaltire in maniera adeguata.

Quindi in questo modo ci preoccupiamo di qual è il target di affidabilità: se per un oggetto è previsto un certo tempo di missione, io ingegnere progettista dovrò decidere che probabilità dichiarare, a chi compra il mio oggetto, di utilizzarlo per il tempo di vita previsto. Perciò saremo noi a scegliere se fare un oggetto che costa di più e dura di più oppure costa di meno, ma non copre tutto il tempo di missione.

Tant'è vero che poi oltre a chiedersi quale target vogliamo raggiungere, tra le domande consigliate c'è quella relativa ai costi associati all'obiettivo. Es. se voglio una macchina che raggiunga un certo target affidabilistico di 400.000 Km, avrò dei costi per ottenere tale obiettivo.

Poi ci si può chiedere se coincide la nostra idea di uso con quella che ha l'utente; come l'utente pianificherà l'uso di questo oggetto e soprattutto come potrà maltrattarlo.

Infatti pensando ai guasti possiamo immaginare che ci saranno delle modalità d'uso del nostro oggetto proibite, ma inevitabili, perciò occorre decidere in che misura permetterle (Es. Il telefono non è fatto per cadere, ma in fase di progettazione si fa resistente a cadute da altezze inferiori a 1,8 m).

Nella tabella a seguire viene riportato uno studio dei requisiti (requirements) di un pager (cercapersone)



Requirement	Useful Tool	Expectation
Customer Use Plan	Benchmarking/ FMEA	<ul style="list-style-type: none"> • Receives information in numerous building-type structures and environments • Audible beep • Tolerates mechanical wear and tear on beeper buttons and belt clip • State-of-the-art capability
Life Hazard Conditions	FMEA	<ul style="list-style-type: none"> • Survives numerous polluted environments • Withstands different temperature extremes • Withstands corrosive coastal environments
Common Misuse	FMEA	<ul style="list-style-type: none"> • Survives numerous shocks from being dropped from heights of up to 6 feet • Survives numerous vibration exposures from normal use and being tossed around • Survives exposure to water (being left out in the rain or dropped momentarily into a wet area, such as a sink or puddle)
Service Life Needs	Benchmarking/ FMEA	<ul style="list-style-type: none"> • Easy access for battery changes • Mechanical durability of battery clip
Reliability Goals	RPM	<ul style="list-style-type: none"> • 99% reliability for five-year life

Questi requisiti li valutiamo poiché si possono trasferire facilmente ad un moderno smartphone. Fra gli strumenti utili vediamo il modello FMEA e poi ci sono le tecniche di Benchmarking, cioè delle prove basate su questionari standard che deve compilare chi esegue la verifica di un oggetto. A destra invece ci sono le aspettative dell'utente nei confronti dell'oggetto prodotto in termini descrittivi delle possibili modalità d'uso. Alla fine di questa analisi si ottiene questa tabella che in pratica rappresenta il target affidabilistico che vogliamo raggiungere.

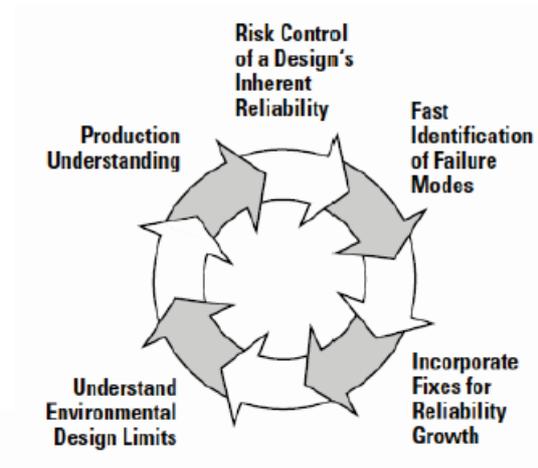
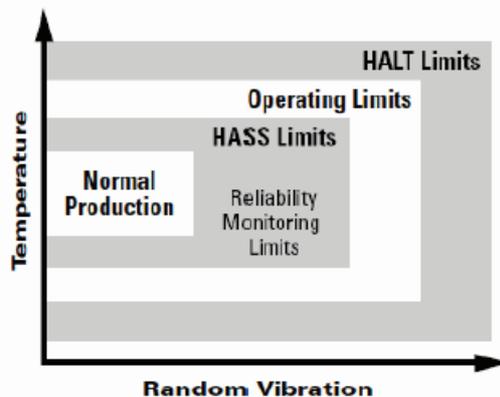
Vediamo adesso come ci si può muovere affinché quell'obiettivo sia compatibile con il Time-to-market del mio prodotto. Il problema grande dell'affidabilità è che non si possono aspettare i tempi normali di funzionamento per decidere che il target affidabilistico è stato raggiunto, altrimenti rischiamo di arrivare sul mercato con un prodotto che rispecchia i requisiti individuati, ma è vecchio rispetto alle esigenze del mercato. Perciò si propongono nella fase iniziale di produzione gli HALT.

HALT (Highly Accelerated Life Testing):

Design Assessment Reliability Testing

■ Highly Accelerated Life Testing (HALT)

- Stress termici
- Vibrazioni
- Temperatura e vibrazioni
- Sbalzi termici (rapidi)



C'è un pseudo piano cartesiano dove in ascissa e ordinata sono presenti due tipi di sollecitazione tipici: Temperature e Vibrazione casuale. Normalmente ci aspettiamo che l'oggetto nella sua vita utile si muova su un certo range di temperature subendo una certa quantità di vibrazioni ammissibili (**Normal Production**). Il riquadro più esterno bianco è il limite che io progettista fisso sulla base dell'analisi dei componenti. Cioè ogni componente avrà i suoi valori massimi consentiti per ogni parametro, noi abbiamo effettuato le connessioni dei componenti per creare il sistema, quindi siamo a conoscenza sia dei limiti dovuti ai componenti che di quelli legati alle interconnessioni. Entro questi limiti si può garantire la sopravvivenza del sistema. All'interno dei limiti operativi ci sono i limiti usati per il monitoraggio di affidabilità. Infatti per valutare se gli oggetti funzionano, questi vengono sottoposti a cicli termici e di vibrazione già maggiori a quelli a cui saranno sottoposti durante il normale funzionamento. Ovviamente durante i test gli stress rimangono al di sotto dei limiti operativi, altrimenti l'oggetto poi si distrugge.

Nella fase iniziale di crescita dell'affidabilità si ricorre invece a test potenzialmente distruttivi. Quindi un ciclo HALT supera i limiti operativi: questo si fa perché abbiamo bisogno di stimolare le modalità di guasto e avere delle statistiche di guasto del mio oggetto in tempi ragionevoli e compatibili col Time to Market. Ovviamente non si

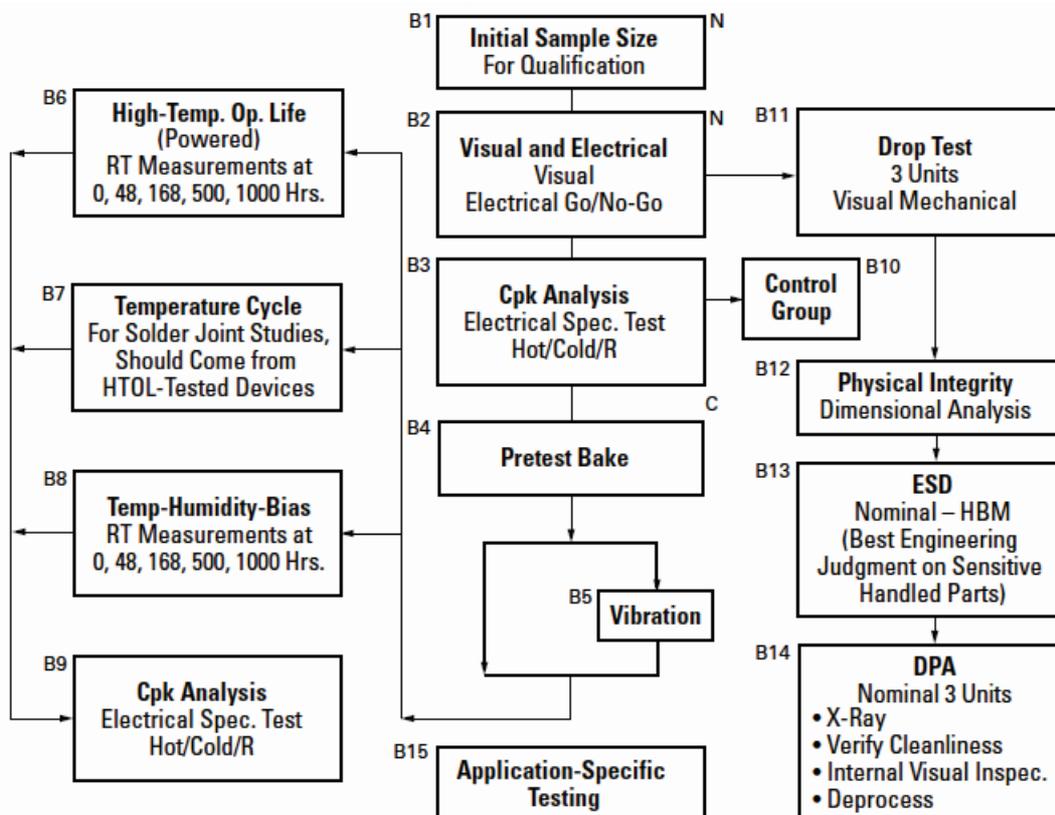
può esagerare, ma bisogna operare proprio sul limite tra funzionamento in condizioni estreme e guasto permanente del dispositivo per arrivare ad avere informazioni significative.

Nota: il grafico T-V è solo illustrativo, poiché in realtà si parla di stress termici assoluti, cioè esposizione statica a temperature limite, ma anche cicli termici.

Inoltre nell'ambito di questi test è importante valutare subito la causa di un eventuale danno che si manifesta, trovare subito un rimedio progettuale che sistemi il danno. Proprio per quest'ultima caratteristica è utile osservare che durante la fase di crescita dell'affidabilità il progetto si modifica, poiché tutti questi fixes vengono inseriti nel progetto globale del sistema.

L'affidabilità cresce proprio perché mentre si eseguono questi test, analizziamo le modalità di guasto e interveniamo, modificando il progetto, in modo tale da rendere più robusto il prodotto rispetto a quel tipo di problema.

È molto facile che un produttore renda fruibile il suo ciclo di testing in produzione attraverso una tabella simile a questa:



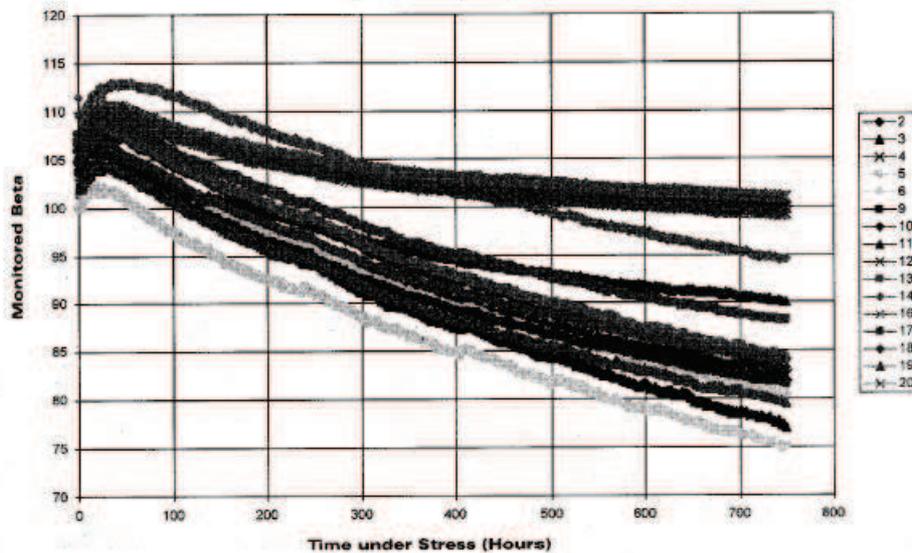
In questo modo ci spiega come fa a garantirci una certa qualità per un certo tipo di prodotto. Ad esempio in questo caso vengono presi un certo campione di oggetti e viene fatto un test elettrico visivo go-no-go. Gli oggetti che in questa fase vengono

scartati, vengono utilizzati per fare dei test distruttivi su alcuni dei requirements, ad esempio il drop test per le cadute da 1,8 m.

Mentre gli oggetti che superano il test go-no-go iniziale, vengono utilizzati per fare dei test di funzionamento a una certa temperatura, test di vibrazione e simili.

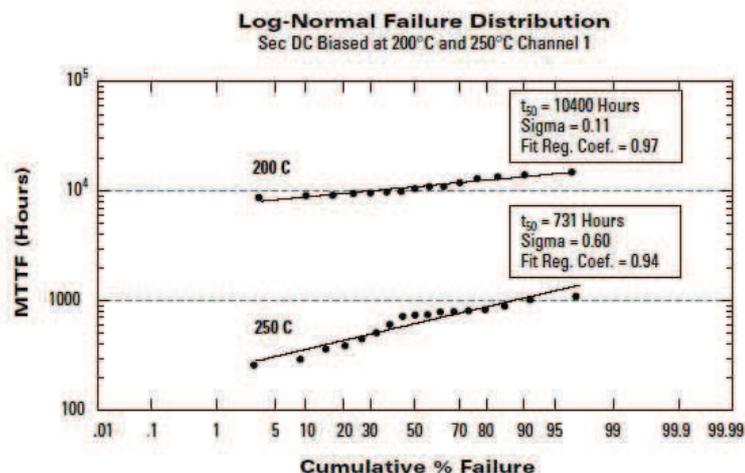
Naturalmente la chiave dei meccanismi di tipi HALT consiste nella disponibilità di un modello d'accelerazione: bisogna capire quante ore di vita normale vale un'ora di test accelerato, per poter poi riportare i dati previsti alle situazioni di vita normale.

Dal grafico seguente si evince che un componente elettronico subisce una degradazione nelle prestazioni durante la vita di funzionamento:



Questo andamento rappresenta l'andamento del Beta di un transistor e è causato dall'aumento della temperatura. Perciò bisogna fare attenzione a queste cose, poiché durante la vita utile di un oggetto, a seconda di come viene usato e in che condizioni, si hanno effetti sulle prestazioni.

Il grafico seguente è più interessante, poiché ci dà un'idea di quanto è accelerata la vita del dispositivo. In questo caso si fa riferimento ad una distribuzione di guasto log-normale, più sofisticata di quella esponenziale vista in precedenza.



Questo grafico fa riferimento ad un esperimento abbastanza semplice: viene presa una popolazione di oggetti, viene fatta funzionare e si vede qual è la percentuale di oggetti che si guastano. Quindi tutti i punti indicano la rottura di un certo numero di oggetti. Facendo poi la regressione lineare, cioè trovando la retta che meglio interpola questi punti, si esamina l'intercetta al 50%. La cosa interessante è che eseguendo questa procedura a temperature diverse, mi permette di trovare l'andamento del tempo medio al guasto rispetto al parametro di accelerazione (in questo caso la temperatura). Infatti si vede che a 200° c'è una retta e a 250° si ha una retta con pendenza maggiore: quindi abbiamo due punti che ci permettono di interpolare un modello di accelerazione. Se abbiamo in mente un modello ragionevole d'accelerazione, lo possiamo interpolare con quei due punti. Tipicamente un modello di accelerazione che si utilizza per il parametro temperatura è il modello di Arrhenius (determina la velocità delle reazioni chimiche).

■ Fattore di accelerazione

$$A = \frac{t}{t'}$$

- t = MTBF in condizioni normali
- t' = MTBF in condizioni accelerate

■ Modello di Arrhenius

$$R = B e^{-\frac{E_A}{kT}}$$

- E_A = energia di attivazione, B = cost., k = Boltzmann, T =temp.

Quindi se usiamo un modello di questo tipo anche per l'affidabilità del componente in funzione della temperatura, avendo due punti noti a disposizione, possiamo stimare l'energia di attivazione e la costante B .

NOTA: Questo è fondamentale perché mi permette di trovare il fattore di accelerazione A, possiamo dire ad esempio che il tempo normale vale 100 volte il tempo accelerato.

Ovviamente ci sono anche altri modelli semi empirici molto più complicati di questo.

Quindi la crescita di affidabilità è quel processo nel quale vengono identificati e risolti i meccanismi di guasto per soddisfare le specifiche di affidabilità.

L'aspetto interessante è relativo al compromesso tra tempo di test e crescita di affidabilità: l'incremento di affidabilità che si ottiene è legato al tempo cumulativo di test attraverso una legge del tipo

MTBF proporzionale a T^d

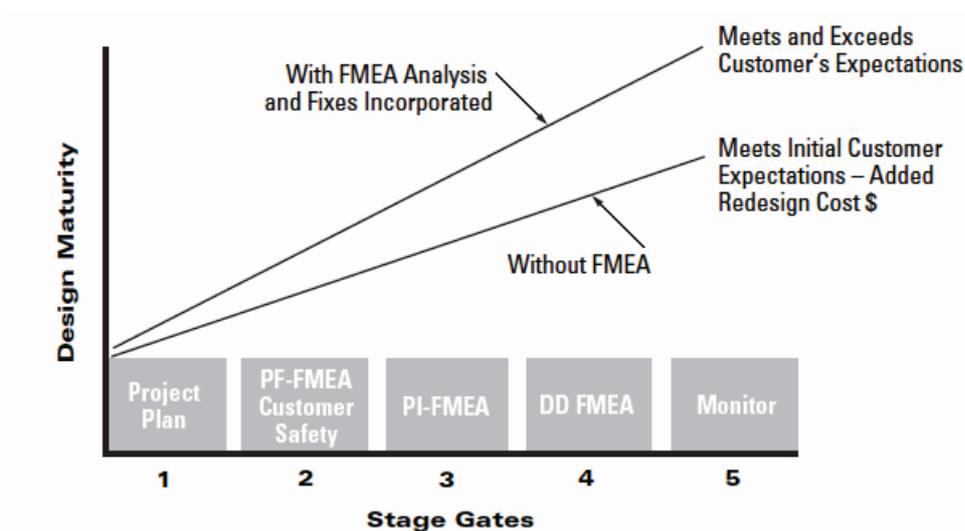
□ T = tempo cumulativo di test

dove "d" è una costante >1 .

Quindi l'aumento di affidabilità che riusciremmo ad ottenere dipende da quanto tempo siamo disposti a perdere in collaudo. Questo è il dilemma chiave della produzione ed è anche l'elemento che determina l'importanza dell'accelerazione dei test: per potere arrivare ad un certo obiettivo di affidabilità servirà necessariamente un certo tempo di test. Notate che questi modelli non sono robusti: nel settore aeronautico, ad esempio, ci sono stati dei ritardi nella consegna di due modelli di aerei dell'ordine dei 5 anni. Perché? Sono stati causati dal raggiungimento di un target affidabilistico previsto: infatti, da un lato l'uomo sa stimare facilmente i tempi di progetto che servono per realizzare una cosa, d'altra parte il tempo per raggiungere un target di affidabilità non è facile da calcolare, anzi si dilata sempre rispetto alle attese. Perciò gli analisti utilizzano dei modelli che tengono conto di quanto tempo occorrerà per consegnare un oggetto con determinate caratteristiche.

FMEA (Failure Modes and Effects Analysis)

Questo è un argomento importante, poiché tratta un documento che poi, per chi va a lavorare in azienda, capiterà spesso di avere tra le mani.



Si tratta essenzialmente di un report, un supporto software o cartaceo, che identifica un ben preciso protocollo, con cui si analizza il progetto nelle varie fasi componente per componente, sottosistema per sottosistema, cercando di identificare in modo precoce l'insorgere di potenziali problemi.

Abbiamo già detto che il primo passo consiste nell'identificare gli obiettivi o le attese della valutazione, ma l'obiettivo di questo protocollo è quello di identificare i problemi in maniera precoce e dare una priorità agli aspetti critici.

Questo grafico ci dice che con l'uso di questo sistema e inserendo nel progetto l'uso dei provvedimenti correttivi che da questa analisi derivano, si arriva con tempi minori alla maturità di progetto.

Cosa ci aspettiamo di trovare in questi fogli?

Si tratta di lunghi elenchi con tante righe dove naturalmente c'è un elenco di tutti i componenti, sistemi, sottosistemi, saldature, cablaggi, ecc. e poi per ogni componente, sulla base dell'esperienza ingegneristica aziendale, vengono ipotizzati dei possibili Failure Modes. In pratica ci si chiede: *come si può rompere questo oggetto?* Ovviamente le risposte vengono date a ragion veduta, proponendo delle modalità di guasto ragionevoli senza considerare l'arrivo di un eventuale meteorite. Dopo di che, partendo da queste ipotesi si cerca di capire quali effetti avranno sul sistema le modalità di guasto supposte ragionevoli; cioè si valuta come il sistema diventa non-conforme con le specifiche iniziali.

In seguito si identificano le cause scatenanti gli effetti e poi, la parte quantitativa di questo protocollo è relativa al RPN (**Risk Priority Number**): in pratica si cerca di arrivare ad una valutazione evento per evento che ci permetterà di fare una graduatoria. Perciò l'obiettivo del FMEA è quello di elencare tutti i failure modes di tutti i componenti attribuendo a ciascuno il suo RPN, quello con RPN maggiore, sarà il primo ad essere gestito.

È importante capire quali elementi concorrono alla valutazione, quale griglia di valutazione viene usata per il calcolo RPN, che è un numero che si ottiene moltiplicando tre fattori:

$$\text{RPN} = \text{Importanza} * \text{Frequenza} * \text{Rilevazione}$$

dove indicano:

- ✓ **Importanza:** è l'importanza a partire dalle conseguenze ed è legata al danno, che in ordine agli obiettivi di prodotto, quel guasto procura.
- ✓ **Frequenza:** si riferisce alla probabilità che un guasto avvenga ed è stimata normalmente a priori, poiché lo FMEA è un documento che si usa in varie fasi di design. Quindi a livello di prototipo si fanno delle ipotesi del tipo "questo è più probabile", "questo è improbabile" e simili: sembra un po' di tirare a caso però di solito nelle brain storming aziendali funziona così. Nel FMEA in fase di design maturity ci sono dei dati importanti che vengono fuori dalla catena di assistenza: quindi la frequenza è una frequenza vera di guasti rilevati sul campo. Quindi **NOTA** a seconda dello stage in cui l'FMEA viene compilato, la probabilità che si verifica quel guasto assume una rilevanza di spessore diverso.
- ✓ **Rilevazione :** indica l'evidenza del guasto, la sua diagnosticabilità. Il fatto che un guasto di un componente risulti occulto aumenta in modo moltiplicativo il suo danno potenziale. Ecco perché normalmente rende vani una serie di provvedimenti progettuali intrapresi proprio per ridurre l'effetto di un danno. Ad esempio pensate a macchine, che devono potere funzionare anche in assenza di alimentazione di rete, come un respiratore. Se va via la corrente, c'è una batteria che fa da tampone e poi c'è un circuito che segnala lo stato di carica della batteria. Se la batteria è rotta e il circuito segnala che è carica, ma in realtà non lo è, nel momento in cui va via la corrente il paziente morirà poiché non era stato possibile diagnosticare il guasto della batteria. Perciò la rilevabilità di un guasto aumenta il valore del RPN.

L’FMEA viene fatto in varie fasi del progetto, perciò la procedura per cui si elencano i componenti e si valutano i guasti si ripete più volte, com’è evidente nella tabella:

Stage Gate	FMEA Activity Expected
Idea Stage	FMEA Project Planning
Evaluate	Product Function FMEA (PF-FMEA)
Development	Product Interface FMEA (PI-FMEA)
Transition	Detail Design FMEA (DD-FMEA)
Production	Product Process FMEA (PP-FMEA)
	Updates if necessary

e naturalmente ogni FMEA di uno stadio successivo parte da quello ottenuto dallo stadio precedente: si fa un update fase per fase.

A seguire viene riportato un esempio di come appare una schermata di un FMEA:

Failure Mode and Effect Analysis															
System: XXX				(PI-FMEA)				FMEA Number: XXX							
Subsystem: XXX								Page: 1 of 2							
Component: XXX								Prepared by: XXX							
Model Year(s)/Vehicle(s): XXX								FMEA Date (Orig.):							
Core Team:								FMEA Update:							
Item Function	Potential Failure Mode	Potential Effect(s) of Failure	SEV	CLASS	Potential Cause(s)/ Mechanism(s) of Failure	OCCUR	Current Design Controls	DETEC	RPN	Recommended Action(s)	Responsibility & Target Completion Date	Action Results			
												Actions Taken	SEV	OCCUR	DETEC
Electrical	open	No effect	1	c	solder joints or	1	Note 1	6	6	N/A					
Pin #1	open	for 1 of 3	1		metalization	1		6	6	N/A					
Electrical															
Ground															
Electrical	open	Loss of RF	10	c	Hot R3 or	6		3	180	Note 2					
Pin #2	open	generation	10		solder joints or	1	Note 1	6	60	N/A					
Electrical	open		10		metalization or	1		6	60	N/A					
V osc	shorted		10		FET	4		3	120	Note 3					
Electrical	open	Degradation	10	c	solder joints or	1	Note 1	6	60	N/A					
Pin #3	open	of range	10		metalization or	1		6	60	N/A					
Electrical	shorted	evaluation	10		varactor	2		2	40	N/A					
V tuning															

Ci sono i vari dati identificativi dei componenti elettrici, in particolare dei pin di contatto che, come possibile guasto prevedono il cortocircuito o il circuito aperto. Per gli effetti si va da “nessun effetto” a “danno massimo”. Vengono descritte anche le cause che potrebbero causare quel danno. Ovviamente queste scale di

valutazione sono formalizzate, non sono valori da 1 a 10 casuali, ma ognuno ha un suo specifico significato, come è evidente nelle tabelle a seguire:

Rating	Guideline	Rank
Very High	Indicates a potential failure mode that could cause death (9 with warning, 10 without warning).	10 9
High	High customer dissatisfaction due to the nature of the failure, such as a major system (e.g., automobile engine) function being inoperative.	8
High to Moderate	Can also be an inoperable convenience system (e.g., air-conditioning system). Do not involve safety aspects.	7
Moderate	Failure causes some customer dissatisfaction.	6
Moderate to Low	Customer is made uncomfortable or is annoyed by the failure.	5
Low	Customer will notice some subsystem or vehicle performance deterioration.	4
Low to Minor	The nature of failure causes only slight annoyance. The customer will probably only notice a slight deterioration of the performance.	3
Minor	Unreasonable to expect that the minor nature of this failure would cause any real effect on the system performance.	2
Very Minor	Most customers would probably not even notice the failure.	1

Failure Rate	Likelihood of Failure	Ranking	Occurrence per Unit Time
Very High	Failure is almost inevitable.	10	1 in 2 (50%)
		9	1 in 3 (33%)
High	Repeated failures.	8	1 in 8 (12.5%)
		7	1 in 20 (5%)
Moderate	Occasional failures.	6	1 in 80 (1.25%)
		5	1 in 400 (0.25%)
		4	1 in 2,000 (0.05%)
Low	Relatively few failures.	3	1 in 1,500 (666 PPM)
		2	1 in 150,000 (6.66 PPM)
Remote	Failure is unlikely.	1	1 in 1,500,000 (0.66 PPM)

Rating	Guideline	Rank
Certainty of Nondetection	Screening cannot detect a potential failure mechanism, or there is no screen.	10
Very Low	Screening probably will not detect a potential failure mechanism.	9
Low	Screening not likely to detect a potential failure mechanism.	8
		7
Moderate	Screening may detect a potential failure mechanism.	6
		5
High	Screening has a good chance of detecting a potential failure mechanism.	4
		3
Very High	Screening will almost certainly detect a potential failure mechanism.	2
		1

Osservate: per ogni riga si ha $RPN = SEV * OCCUR * DETEC$. Ad esempio per la prima riga $RPN = 1 * 1 * 6 = 6$.

In generale vale che $1 < RPN < 1000$.

Appunti di Campi Elettromagnetici

Capitolo 8 – parte I

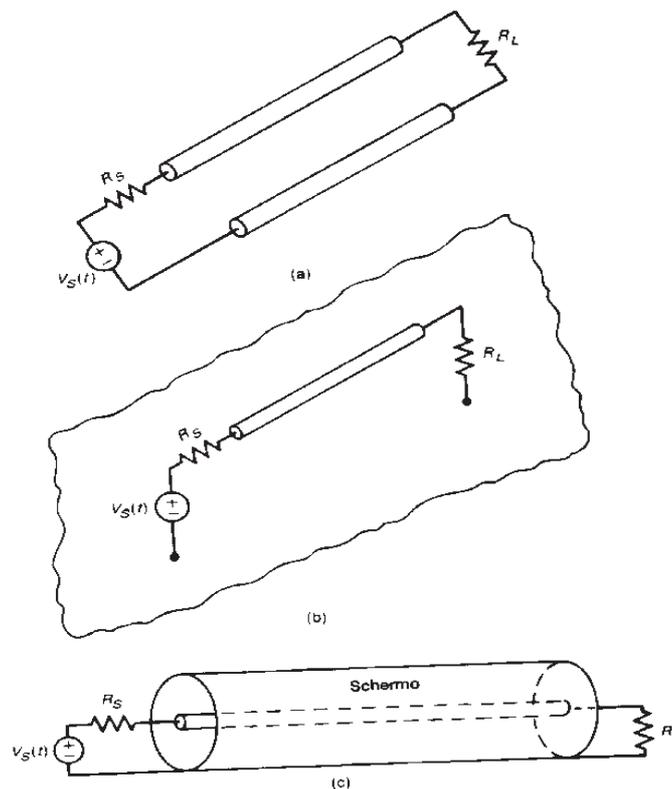
Linee di trasmissione

<i>Introduzione</i>	2
<i>Equazioni dei telegrafisti</i>	3
Parametri per unità di lunghezza	7
<i>Soluzione nel dominio della frequenza</i>	7
Risoluzione delle equazioni dei telegrafisti	8
Osservazione: tensione e corrente nel dominio del tempo	11
<i>Impedenza caratteristica della linea</i>	13
<i>Condizioni al contorno</i>	14
<i>Caso particolare: assenza di perdite ($\alpha=0$)</i>	15
<i>Impedenza di ingresso</i>	16
Caso particolare: perdite nulle.....	17
Osservazione: applicazione della matrice ABCD	18
Valore esatto della costante di propagazione γ in assenza di perdite	19
<i>Caso particolare: Condizione di Heavyside</i>	20
<i>Caso particolare: carico costituito da cortocircuito</i>	21
<i>Caso particolare: carico costituito da un circuito aperto</i>	21
<i>Diagrammi della tensione e della corrente in assenza di perdite</i>	23
1° caso: carico costituito da un cortocircuito	23
2° caso: carico costituito da un circuito aperto	24
3° caso: carico adattato.....	24
<i>Valutazione analitica dei diagrammi di tensione e corrente</i>	26
<i>Rapporto d'onda stazionario</i>	28
<i>Diagrammi dell'impedenza di ingresso</i>	29
<i>Linea di lunghezza $\lambda/4$ come invertitore di impedenza</i>	32
Osservazione	34
<i>Coefficiente di riflessione sul carico</i>	35
Coefficiente di trasmissione sul carico.....	36
Osservazione	39

Introduzione

Una **linea di trasmissione** è semplicemente un sistema formato da due o più conduttori paralleli ravvicinati. In questo capitolo ci occupiamo specificamente del caso in cui i conduttori sono solo due.

Alcuni esempi tipici, e allo stesso tempo semplici, di linee di trasmissione formate da due conduttori sono illustrati nella figura seguente:



Nella figura (a) è rappresentata una semplice **linea di trasmissione a due fili paralleli**, in cui i due conduttori sono cilindrici con sezione circolare.

In tutti i casi, l'alimentazione della linea è costituita da una **sorgente** rappresentabile tramite il suo equivalente di Thevenin: essa è perciò modellata tramite una tensione di circuito aperto $V_S(t)$ in serie ad una resistenza R_S . Questa alimentazione è connessa, mediante i conduttori della linea, ad un **carico** di resistenza R_L .

Un altro esempio di linea di trasmissione a due fili è quello della figura (b), in cui è presente un solo conduttore cilindrico, mentre l'altro è stato sostituito da un **piano di massa** (ovviamente metallico) di dimensioni idealmente infinite. Tale piano di massa svolge perciò la funzione di **conduttore di ritorno** per il segnale, il quale, partendo dalla sorgente, raggiunge il carico tramite il conduttore cilindrico (**conduttore di andata**).

Un altro caso ancora è quello della figura (c), in cui è riportato il classico **cavo coassiale** (ad esempio utilizzato per la connettere il televisore alla presa TV domestica). In questo caso, uno schermo cilindrico a sezione circolare (la cosiddetta **calza**) racchiude un conduttore (detto **cuore**) che è localizzato lungo l'asse dello schermo: il cuore funge da conduttore di andata per il segnale, mentre la calza funge da conduttore di ritorno.

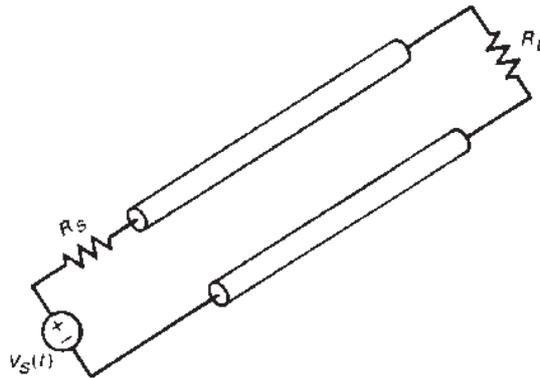
Equazioni dei telegrafisti

Il problema generale dell'analisi delle linee di trasmissione a due conduttori consiste nel determinare, in tutti i punti della linea, le correnti nei conduttori e le tensioni tra i conduttori. In particolare, ciò che ha più importanza è la valutazione di tali correnti e tensioni in corrispondenza della sorgente ed in corrispondenza del carico, ossia agli estremi della linea propriamente detta.

Esistono diversi metodi per affrontare questo problema e possono essere raggruppati sostanzialmente in due gruppi: quelli basati sulla **teoria delle reti elettriche** e quelli che derivano dalla **teoria dell'elettromagnetismo**. Noi seguiamo un comune metodo derivato dalla teoria delle reti elettriche.

Nel seguito considereremo solo linee di trasmissione "uniformi": una linea di trasmissione è **uniforme** quando la geometria della sezione trasversale (intesa cioè come la sezione trasversale sia dei conduttori sia del dielettrico) rimane invariata in ogni punto della linea stessa.

Per poter ricavare le equazioni della generica linea di trasmissione a due conduttori, supponiamo di orientare i conduttori stessi lungo l'asse z di un sistema di coordinate cartesiane. Dato che non intendiamo fare una analisi di tipo elettromagnetico, la natura della linea può essere qualunque, nel senso che potrà trattarsi di un cavo coassiale, di una linea bifilare e così via. Tanto per fissare le idee, possiamo pensare di riferirci ad una linea bifilare del tipo riportato nella figura seguente, anche se i risultati che otterremo saranno del tutto generali, validi per qualsiasi caso:

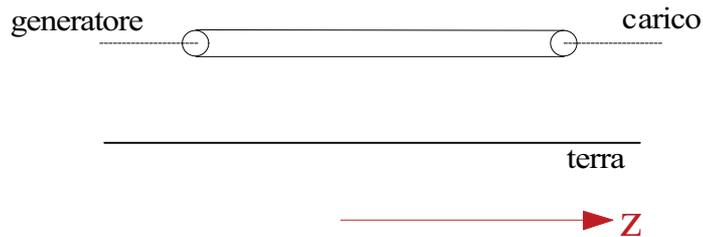


L'asse z è dunque quello parallelo ai due conduttori, per cui gli assi x ed y definiscono un piano ortogonale (trasversale) ai conduttori stessi.

Facciamo per il momento l'ipotesi che la linea sia infinitamente estesa: questo garantisce che non nascano perturbazioni sui campi dovute agli estremi della linea stessa.

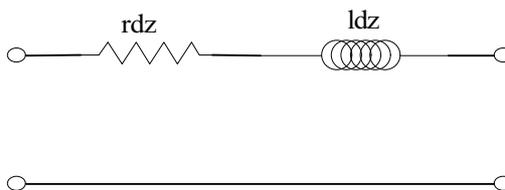
Il generatore applica una certa tensione ad un capo della linea e questa tensione si propaga lungo la linea fino a giungere al carico. Vogliamo allora stabilire in che modo si propaghi tale tensione e, ovviamente, in che modo si propaghi la corrente elettrica che da essa deriva.

Dato che la propagazione avviene dal generatore verso il carico, stabiliamo (per il momento) come **direzione di riferimento** quella parallela alla linea e orientata in direzione del carico stesso:

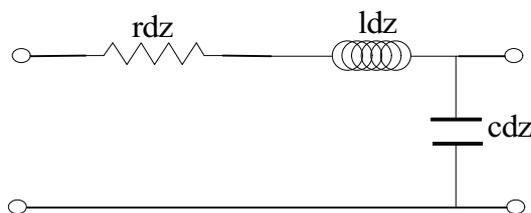


Ai fini della nostra analisi, consideriamo un *tratto infinitesimo* della linea e supponiamo che esso abbia lunghezza dz . Proviamo a costruire un modello circuitale di questo tratto infinitesimo di linea: sappiamo intanto che la linea di trasmissione, essendo costituita di materiali conduttori, è caratterizzata da una certa resistenza e da una certa induttanza; allora, se indichiamo con r la **resistenza per unità di lunghezza** e con l l'**induttanza per unità di lunghezza**, è chiaro che il nostro tratto di linea dz sarà caratterizzato da una resistenza $R=r \cdot dz$ e da una induttanza $L=l \cdot dz$.

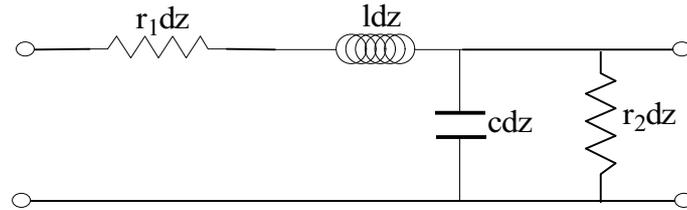
Possiamo allora cominciare a rappresentarlo nel modo seguente:



La resistenza e l'induttanza sono due parametri che tengono conto dei cosiddetti *effetti longitudinali* nella linea. Ci sono però anche i cosiddetti *effetti trasversali*, dovuti al fatto che la linea corre in parallelo alla terra, sviluppando perciò degli effetti capacitivi: indicata allora con c la **capacità per unità di lunghezza** della linea, il tratto dz sarà caratterizzato anche da una capacità $C=c \cdot dz$. Il modello circuitale si perfeziona perciò nel modo seguente:

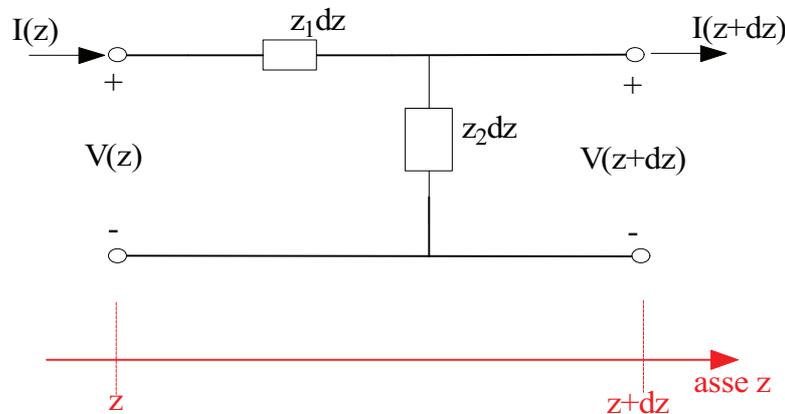


La capacità appena inserita è valida, del resto, solo nel caso in cui il dielettrico compreso tra la linea e la terra presenti conducibilità nulla; al contrario, ci sono varie ragioni che invece rendono questa conducibilità non nulla. Per tenerne conto, ci basta inserire in parallelo alla capacità una nuova resistenza $R=rdz$. Tuttavia, per distinguere questa resistenza da quella considerata prima, usiamo i pedici "1" e "2" come nella figura seguente:



Questo è dunque il modello circuitale equivalente attraverso il quale intendiamo descrivere la propagazione dell'onda di tensione e dell'onda di corrente attraverso l'elemento infinitesimo dz della linea di trasmissione considerata. La nostra linea di trasmissione sarà costituita da una cascata di circuiti di questo tipo e terminata ad un estremo della sorgente (generatore di tensione in serie ad una resistenza) ed all'altro dal carico (resistenza).

Notiamo una cosa: fino ad ora, non abbiamo ancora fatto alcuna ipotesi sul tipo di segnale che va ad eccitare la linea di trasmissione, per cui non possiamo dire niente circa il regime di corrente e di tensione che si instaura lungo la linea. Vedremo invece che risulta di notevole interesse il caso in cui l'eccitazione sia di tipo **sinusoidale isofrequenziale**: in questo caso, infatti, una volta raggiunta una condizione di regime (cioè una volta esauriti tutti i possibili fenomeni transitori), le correnti e le tensioni sono a loro volta di tipo sinusoidale. In questa condizione di funzionamento, i quattro elementi circuitali introdotti poco fa possono essere sostituiti con le rispettive impedenze, il che consente di semplificare la serie ed il parallelo che si creano e di ricondursi quindi ad un nostro modello finale del tipo seguente:



Abbiamo ovviamente considerato le seguenti impedenze:

$$\dot{z}_1 = (r_1 + j\omega l)$$

$$\dot{z}_2 = \frac{1}{\dot{y}_2} = \frac{1}{(r_2 + j\omega c)}$$

Per condurre l'analisi preliminare del modello ottenuto, mettiamoci per il momento nel caso di un regime generico, non necessariamente sinusoidale.

Notiamo che il modello circuitale cui siamo pervenuti è quello di un classico doppio bipolo. Indichiamo allora con $\mathbf{V}(\mathbf{z}, \mathbf{t})$ ed $\mathbf{I}(\mathbf{z}, \mathbf{t})$ la tensione e la corrente alla porta di ingresso (cioè in corrispondenza della generica sezione z) e con $\mathbf{V}(\mathbf{z}, +d\mathbf{z}, \mathbf{t})$ e $\mathbf{I}(\mathbf{z}, +d\mathbf{z}, \mathbf{t})$ la tensione e la corrente alla porta di uscita (cioè in corrispondenza della sezione $z+d\mathbf{z}$). Entrambe queste coppie (tensione, corrente) sono funzioni sia dello

spazio (che, per ragioni di simmetria, è "rappresentato" solo dalla coordinata z) sia del tempo.

Il nostro scopo è quello di trovare le equazioni che legano le tensioni e le correnti in corrispondenza delle sezioni z e $z+dz$. A causa della distanza fisica tra le due porte ⁽¹⁾, sia la tensione sia la corrente subiranno delle variazioni nel passaggio da una tensione all'altra. Applicando banalmente le leggi di Kirchoff, otteniamo quanto segue:

$$V(z + dz, t) - V(z, t) = -r_1 \cdot dz \cdot I(z, t) - l \cdot dz \cdot \frac{\partial}{\partial t} I(z, t)$$

$$I(z + dz, t) - I(z, t) = -g_2 \cdot dz \cdot V(z + dz, t) - c \cdot dz \cdot \frac{\partial}{\partial t} V(z + dz, t)$$

La prima equazione rappresenta la differenza tra la tensione in uscita e quella in ingresso, così come la seconda equazione rappresenta la differenza tra la corrente in uscita e quella in ingresso.

Affinché questo modello circuitale a parametri concentrati sia valido, occorre che la lunghezza dz sia elettricamente corta rispetto alla lunghezza d'onda ⁽²⁾. Dobbiamo allora supporre che sia $dz \rightarrow 0$.

Prima ancora di fare questa ipotesi, riscriviamo le ultime due equazioni nel modo seguente, in cui dividiamo primo e secondo membro per dz :

$$\frac{V(z + dz, t) - V(z, t)}{dz} = -r_1 \cdot I(z, t) - l \cdot \frac{\partial}{\partial t} I(z, t)$$

$$\frac{I(z + dz, t) - I(z, t)}{dz} = -g_2 \cdot V(z + dz, t) - c \cdot \frac{\partial}{\partial t} V(z + dz, t)$$

A questo punto, possiamo calcolare il limite per $dz \rightarrow 0$ di entrambi i membri di entrambe le equazioni: ai primi membri otteniamo due derivate (limiti dei rispettivi rapporti incrementali), mentre al secondo membro le tensioni e le correnti alla sezione z tendono a coincidere con quelle alla sezione $z+dz$. Quindi

$$\boxed{\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} V(z, t) &= -r_1 \cdot I(z, t) - l \cdot \frac{\partial}{\partial t} I(z, t) \\ \frac{\partial}{\partial z} I(z, t) &= -g_2 \cdot V(z, t) - c \cdot \frac{\partial}{\partial t} V(z, t) \end{aligned}}$$

Queste sono le **equazioni delle linee di trasmissione**. si tratta di un sistema accoppiato di equazioni differenziali alle derivate parziali del primo ordine.

Tali equazioni sono del tutto generali. Tuttavia, spesso è utile far riferimento ad un caso particolare, relativo alle **linee di trasmissione senza perdite**: sono tali quelle linee in cui non ci sono perdite di potenza né all'interno dei conduttori (quindi $\mathbf{r}_1 = \mathbf{0}$) né all'interno del dielettrico di separazione (quindi $\mathbf{r}_2 = \infty$) ⁽³⁾. La ragione principale che conduce all'ipotesi di linea di trasmissione senza perdite è dovuta al

¹ Ricordiamo che stiamo facendo l'ipotesi di un *modello elettrico a parametri distribuiti*

² Ovviamente, stiamo facendo implicitamente l'ipotesi che l'eccitazione della linea sia comunque di tipo periodico, ossia ottenuta come una sovrapposizione di sinusoidi a varie frequenze. Di conseguenza, per stabilire la lunghezza elettrica della linea, si deve far riferimento alla lunghezza d'onda minore, ossia quella associata alla più alta frequenza di utilizzo del modello: infatti, se la linea risulta elettricamente corta rispetto alla lunghezza d'onda più piccola, lo sarà sicuramente anche rispetto alle lunghezze d'onda maggiori (quelle cioè associate a frequenze più basse).

³ In pratica, i conduttori si suppongono a conduttività infinita, mentre il dielettrico si suppone a conduttività nulla.

fatto che essa permette di ottenere ragionevoli approssimazioni dei risultati esatti e, allo stesso tempo, semplifica molto i calcoli.

Parametri per unità di lunghezza

Un'altra importante osservazione, circa le equazioni delle linee di trasmissione, è che, in base al discorso fatto, esse sono relative a linee di trasmissione di tipo qualunque; in altre parole, la forma di tali equazioni rimane invariata qualunque sia la linea di trasmissione (purché ovviamente a due conduttori); il tipo di linea subentra ovviamente nel momento in cui devono essere calcolati i valori dei parametri per unità di lunghezza (r_1 , c , l e g_2): *tutte le informazioni associate alla geometria della sezione trasversale, al tipo di dielettrico ed al tipo di conduttori, informazioni che cioè sono proprie di una particolare linea, sono contenute soltanto nei parametri per unità di lunghezza.*

Soluzione nel dominio della frequenza

Una volta ricavate le equazioni delle linee di trasmissione, il passo successivo è ovviamente quello di risolverle, in modo da trovare come variano, rispetto al tempo ed alla posizione, le forme d'onda della tensione $V(z,t)$ tra i due conduttori e della corrente $I(z,t)$ nei due conduttori.

E' possibile allora ricavare due diverse soluzioni:

- la **soluzione nel dominio del tempo** è quella più completa possibile, in quanto viene ricavata senza formulare ipotesi circa l'andamento temporale dei segnali di eccitazione (4);
- la **soluzione in regime sinusoidale**, invece, presuppone una eccitazione della linea di tipo sinusoidale isofrequenziale e si riferisce inoltre ad una condizione di regime sulla linea, ossia ad una condizione in cui si assumono esauriti tutti i possibili fenomeni transitori.

In questa sede, siamo interessati alla soluzione in regime permanente sinusoidale. La prima ipotesi è dunque quella per cui la sorgente abbia una forma d'onda sinusoidale, ad esempio del tipo seguente:

$$V_s(t) = V_s \cos(\omega t) = \operatorname{Re}\{V_s e^{j\omega t}\}$$

A questa particolare forma d'onda sappiamo di poter associare il **fasore** equivalente:

$$\bar{V}_s = V_s \langle 0^\circ \rangle$$

In questa espressione, il fatto di aver preso una fase nulla indica che stiamo considerando questo fasore come riferimento per tutti gli altri.

La seconda ipotesi consiste nell'assumere che la sorgente sia stata connessa alla linea per un tempo sufficiente alla estinzione di tutti i fenomeni transitori, lasciando così che in ciascun punto della linea si stabilizzino tensioni e correnti

4 Segnaliamo che, talvolta, si parla di soluzione transitorio, ma è un errore, in quanto la soluzione nel dominio del tempo è di tipo globale: essa comprende sia il transitorio sia il regime.

con andamento sinusoidale. Ciò significa che anche queste tensioni e correnti saranno suscettibili di una rappresentazione fasoriale e cioè quindi che potremo comodamente ragionare nel **dominio dei fasori**, da cui poi risalire al dominio dei tempi (che è quello di interesse pratico): la tensione e la corrente in corrispondenza della generica sezione z della linea avranno le rispettive forme d'onda del tipo

$$V(z, t) = \text{Re}\{\bar{V}(z)e^{j\omega t}\}$$

$$I(z, t) = \text{Re}\{\bar{I}(z)e^{j\omega t}\}$$

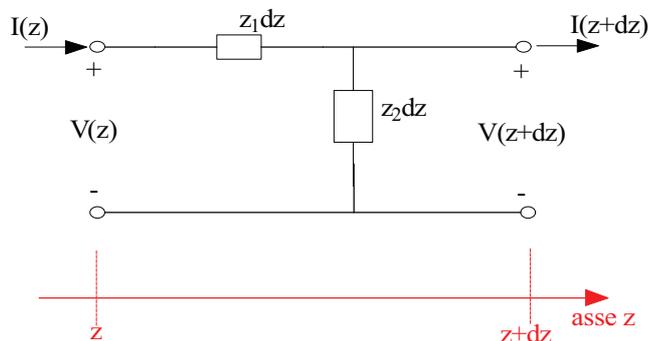
Per semplicità di notazione, nei prossimi paragrafi eviteremo di indicare il "trattino orizzontale" per contrassegnare i fasori e converremo di distinguere tali fasori dalle quantità nel dominio del tempo tramite l'uso delle lettere minuscole. Quindi, adotteremo la seguente simbologia:

$$v(z, t) = \text{Re}\{V(z, \omega)\} = \text{Re}\{V(z)e^{j\omega t}\}$$

$$i(z, t) = \text{Re}\{I(z, \omega)\} = \text{Re}\{I(z)e^{j\omega t}\}$$

Risoluzione delle equazioni dei telegrafisti

Nell'ipotesi di essere in **regime sinusoidale permanente**, abbiamo già visto in precedenza che il modello circuitale equivalente del generico tratto dz della linea è il seguente:



dove abbiamo posto

$$\dot{z}_1 = (r_1 + j\omega l)$$

$$\dot{z}_2 = \frac{1}{\dot{y}_2} = \frac{1}{(r_2 + j\omega c)}$$

Il corrispondente sistema di equazioni differenziali si ottiene facilmente, nel modo seguente.

Applicando la LKT in senso orario, abbiamo che

$$V(z) = (z_1 dz)I(z) + V(z + dz) = I(z)(r_1 + j\omega l)dz + V(z + dz)$$

Possiamo sicuramente porre $V(z+dz)=V(z)+dV$, per cui, effettuando la sostituzione, otteniamo

$$V(z) = (z_1 dz)I(z) + V(z) + dV$$

da cui ricaviamo evidentemente che

$$dV = -Iz_1 dz$$

In modo analogo, applicando la LKC otteniamo che

$$I(z) = (V(z) + dV)y_2 dz + I(z + dz) = (V(z) + dV)(g_2 + j\omega c)dz + I(z + dz)$$

Ponendo anche per le correnti $I(z+dz)=I(z)+dI$, abbiamo che

$$I(z) = y_2(V(z) + dV)dz + I(z) + dI$$

da cui, esplicitando dI , otteniamo

$$dI = -y_2(V(z) + dV)dz = -y_2 V(z)dz - y_2 dVdz$$

Il termine $y_2 dVdz$ è un infinitesimo di ordine superiore rispetto al termine $y_2 Vdz$ e quindi lo possiamo trascurare: otteniamo in tal modo che

$$dI = -V(z)y_2 dz$$

In conclusione, abbiamo ricavato il seguente sistema di equazioni differenziali lineari del 1° ordine a coefficienti costanti:

equazioni dei telegrafisti	$\begin{cases} dV = -I(z)z_1 dz \\ dI = -V(z)y_2 dz \end{cases}$
-------------------------------	--

Tale sistema si può risolvere facilmente, ma è bene tenere presente che la sua soluzione risulta essere unica solo a patto di conoscere le condizioni al contorno, ossia i valori di tensione e di corrente in corrispondenza di una qualsiasi sezione della linea. Allora, ci preoccupiamo prima della sua risoluzione e poi individueremo quali sono le condizioni al contorno.

Intanto, il sistema può essere scritto nella seguente forma compatta:

$$\begin{cases} \frac{dV}{dz} = -Iz_1 \\ \frac{dI}{dz} = -Vy_2 \end{cases}$$

Esso andrebbe risolto con il metodo tradizionale degli autovalori. Tuttavia, data la sua forma, sappiamo di poterlo risolvere anche in altro modo. Consideriamo la prima equazione e differenziamola rispetto a z :

$$\frac{d^2 V}{dz^2} = -z_1 \frac{dI}{dz}$$

Adesso, al posto di dI/dz sostituiamo il secondo membro della seconda equazione e portiamo tutto al primo membro: ciò che otteniamo è

$$\frac{d^2V}{dz^2} - z_1 y_2 V = 0$$

Questa è una normale equazione differenziale del 2° ordine nella sola incognita $V(z)$.

Per comodità e per motivi che saranno chiari tra poco, facciamo la seguente posizione:

$$\boxed{\gamma^2 = z_1 y_2}$$

Così facendo, l'equazione diventa

$$\frac{d^2V}{dz^2} - \gamma^2 V = 0$$

Alla costante γ si dà il nome di **costante di propagazione**: essendo pari alla radice del prodotto di due numeri in generale complessi, sarà anch'essa complessa, per cui la possiamo esprimere nella forma generica

$$\gamma = \alpha + j\beta$$

La costante α prende il nome di **costante di attenuazione**, mentre β prende il nome di **costante di fase**. Queste tre definizioni saranno più chiare tra poco.

Tornando all'equazione differenziale, la risolviamo con il tradizionale *metodo dell'equazione caratteristica*, che in questo caso è

$$s^2 - \gamma^2 = 0$$

Risolvendola, si ricava che $s_{\frac{1}{2}} = \pm\gamma$, per cui l'integrale generale dell'equazione differenziale è

$$V(z) = A_1 e^{\gamma z} + A_2 e^{-\gamma z}$$

Naturalmente, una volta ottenuta l'espressione della tensione, possiamo facilmente ricavarci quello della corrente: infatti, dato che la seconda equazione differenziale era

$$I(z) = -\frac{1}{z_1} \frac{dV}{dz}$$

da essa ci ricaviamo facilmente che

$$I(z) = -\frac{1}{z_1} \frac{d}{dz} (A_1 e^{\gamma z} + A_2 e^{-\gamma z}) = -\frac{\gamma}{z_1} A_1 e^{\gamma z} + \frac{\gamma}{z_1} A_2 e^{-\gamma z}$$

In conclusione, le leggi con cui si propagano spazialmente, lungo la linea, i fasori della tensione e della corrente sono le seguenti:

$$\begin{cases} V(z) = A_1 e^{\gamma z} + A_2 e^{-\gamma z} \\ I(z) = -\frac{\gamma}{Z_1} A_1 e^{\gamma z} + \frac{\gamma}{Z_1} A_2 e^{-\gamma z} \end{cases}$$

In queste due equazioni si osserva che sia la tensione sia la corrente risultano essere somma di due onde: c'è un'onda che si propaga lungo la direzione positiva dell'asse z , cui diamo perciò il nome di **onda diretta**, e c'è un'onda che si propaga lungo la direzione negativa dell'asse z , cui diamo perciò il nome di **onda riflessa**.

Per evidenziare ancora meglio questo fatto, facciamo la seguenti posizioni:

$$\begin{cases} V_r = A_1 \longleftarrow \text{onda riflessa di tensione} \\ V_i = A_2 \longleftarrow \text{onda diretta di tensione} \\ I_r = -\frac{\gamma}{Z_1} A_1 \longleftarrow \text{onda riflessa di corrente} \\ I_i = \frac{\gamma}{Z_1} A_2 \longleftarrow \text{onda diretta di corrente} \end{cases}$$

Così facendo, le espressioni che d'ora in poi considereremo saranno le seguenti:

$$\boxed{\begin{cases} V(z) = V_r e^{\gamma z} + V_i e^{-\gamma z} \\ I(z) = I_r e^{\gamma z} + I_i e^{-\gamma z} \end{cases}}$$

Osservazione: tensione e corrente nel dominio del tempo

Le espressioni ottenute nel paragrafo precedente per $V(z)$ ed $I(z)$ “sembrano” essere funzioni solo dello spazio, ossia “sembra” che le variazioni di tensione e di corrente si registrino solamente spostandosi da un punto all'altro della linea. In realtà, la situazione è più complessa in conseguenza del fatto che il nostro ragionamento è stato condotto nel dominio della frequenza e quindi non evidenzia esplicitamente la dipendenza di V ed I dal tempo.

Per introdurre la dipendenza dal tempo, ovviamente di tipo sinusoidale, basta affermare che l'andamento della tensione e della corrente in ciascun punto z della linea e in ciascun istante t è dato dalle seguenti espressioni:

$$\begin{cases} v(z, t) = \text{Re}[V(z, \omega)] = \text{Re}[V(z)e^{j\omega t}] = \text{Re}[(V_r e^{\gamma z} + V_i e^{-\gamma z})e^{j\omega t}] \\ i(z, t) = \text{Re}[I(z, \omega)] = \text{Re}[I(z)e^{j\omega t}] = \text{Re}[(I_r e^{\gamma z} + I_i e^{-\gamma z})e^{j\omega t}] \end{cases}$$

Per ricavare le espressioni $v(z, t)$ e $i(z, t)$ della tensione e della corrente nel dominio del tempo, che poi è quello di interesse pratico, è necessario e sufficiente moltiplicare i fasori per il termine esponenziale $e^{j\omega t}$ e poi calcolare la parte reale di ciò che si ottiene, il che è sinonimo di antitrasformazione di Fourier.

Possiamo inoltre fare altre considerazioni circa $V(z, \omega)$ e $I(z, \omega)$. Consideriamo per esempio la tensione, visto che il discorso sulla corrente è identico.

Preso una generica sezione z , la tensione in z è dunque data da

$$V(z, \omega) = A_1 e^{\gamma z} e^{j\omega t} + A_2 e^{-\gamma z} e^{j\omega t}$$

Lavorando sugli esponenziali, abbiamo che

$$e^{\gamma z} e^{j\omega t} = e^{(\alpha + j\beta)z + j\omega t} = e^{\alpha z} e^{j(\beta z + \omega t)}$$

$$e^{-\gamma z} e^{j\omega t} = e^{-(\alpha + j\beta)z + j\omega t} = e^{\alpha z} e^{j(-\beta z + \omega t)}$$

Usando queste uguaglianze, possiamo scrivere che

$$V(z, \omega) = A_1 e^{\alpha z} e^{j(\beta z + \omega t)} + A_2 e^{\alpha z} e^{j(-\beta z + \omega t)}$$

In base a questa relazione, $V(z, \omega)$ è la somma di due onde, ciascuna caratterizzata da un termine reale $e^{\alpha z}$, indipendente dal tempo, e da un termine complesso $e^{j(\pm\beta z + \omega t)}$, variabile nel tempo. A quest'ultimo termine si dà in particolare il nome di **fattore di fase** dell'onda: infatti, esso definisce la cosiddetta **fase** dell'onda, che vale $\varphi = \beta z + \omega t$ per l'onda riflessa e $\varphi = -\beta z + \omega t$ per l'onda diretta.

A questo punto, possiamo dare una definizione: *si definisce **velocità di fase** dell'onda la velocità con cui un osservatore deve viaggiare per vedere l'onda con fase costante*. Nota l'espressione della fase dell'onda, è possibile calcolare la velocità di fase dell'onda stessa: nel nostro caso, abbiamo un'onda che viaggia con fase pari a $\varphi_1 = +\beta z + \omega t$ e un'onda che viaggia con fase pari a $\varphi_2 = -\beta z + \omega t$; differenziando rispetto a z entrambe le relazioni, otteniamo

$$d\varphi_1 = +\beta dz + \omega dt$$

$$d\varphi_2 = -\beta dz + \omega dt$$

Se un osservatore viaggia vedendo l'onda riflessa con fase costante, è chiaro che $d\varphi_1 = 0$; in modo analogo, se un osservatore viaggia vedendo l'onda diretta con fase costante, deve essere $d\varphi_2 = 0$. Abbiamo dunque che

$$0 = +\beta dz + \omega dt$$

$$0 = -\beta dz + \omega dt$$

Da qui ricaviamo che le rispettive velocità di fase sono

$$v_{p,1} = \frac{dz}{dt} = -\frac{\omega}{\beta}$$

$$v_{p,2} = \frac{dz}{dt} = +\frac{\omega}{\beta}$$

Tutto ciò ci consente di osservare quanto segue:

- l'onda di tensione $A_1 e^{\alpha z} e^{j(\beta z + \omega t)}$ si propaga con velocità di fase $v_{p,1}$ negativa, ossia dal carico verso il generatore (visto che stiamo considerando un'asse z diretta verso il carico): da qui deriva il termine **riflessa**;

- al contrario, l'onda di tensione $A_2 e^{\alpha z} e^{j(-\beta z + \omega t)}$, si propaga con velocità di fase $v_{p,2}$ positiva (uguale, comunque, in modulo all'altra), ossia dal generatore verso il carico: da qui deriva il termine **diretta**.

Quando l'onda complessiva manca dell'onda riflessa oppure di quella diretta, noi diremo che si tratta di un' **onda progressiva**, in quanto si propaga in un'unica direzione. Se, invece, sono presenti entrambe le componenti, noi parleremo di **onda stazionaria**.

Impedenza caratteristica della linea

Torniamo adesso a ragionare sui fasori $V(z)$ e $I(z)$:

$$\begin{cases} V(z) = V_r e^{\gamma z} + V_i e^{-\gamma z} \\ I(z) = I_r e^{\gamma z} + I_i e^{-\gamma z} \end{cases}$$

Possiamo definire un importante parametro caratteristico della linea: si definisce **impedenza caratteristica** della linea considerata il rapporto tra l'onda incidente di tensione e l'onda incidente di corrente:

$$z_c = \frac{V_i}{I_i} = \frac{z_1}{\gamma}$$

Ricordando che $\gamma^2 = z_1 y_2$, possiamo riscrivere l'impedenza caratteristica nella forma

$$z_c = \sqrt{\frac{z_1}{y_2}} = \sqrt{\frac{r_1 + j\omega \ell}{g_1 + j\omega c}}$$

dove, ovviamente, $\omega = 2\pi f$ è la pulsazione angolare dell'onda applicata dal generatore.

L'impedenza caratteristica z_c e la costante di propagazione γ rientrano nella categoria dei **parametri secondari** di una linea, mentre i parametri r_1, ℓ, c, g_2 sono **parametri primari**. E' evidente che i parametri secondari dipendono solo dal valore dei parametri primari, i quali, come detto in precedenza, tengono conto della natura fisica della linea considerata.

Volendo esprimere $V(z)$ e $I(z)$ in funzione dell'impedenza caratteristica, basta tener conto che $I_r = -\frac{\gamma}{z_1} V_r$ e che $I_i = \frac{\gamma}{z_1} V_i$, per cui abbiamo che

$$\begin{cases} V(z) = V_r e^{\gamma z} + V_i e^{-\gamma z} \\ I(z) = -\frac{V_r}{z_c} e^{\gamma z} + \frac{V_i}{z_c} e^{-\gamma z} \end{cases}$$

Queste equazioni possono anche essere espresse in altro modo, sfruttando le funzioni Seno Iperbolico e Coseno Iperbolico:

$$\sinh(z) = \frac{e^z - e^{-z}}{2}$$

$$\cosh(z) = \frac{e^z + e^{-z}}{2}$$

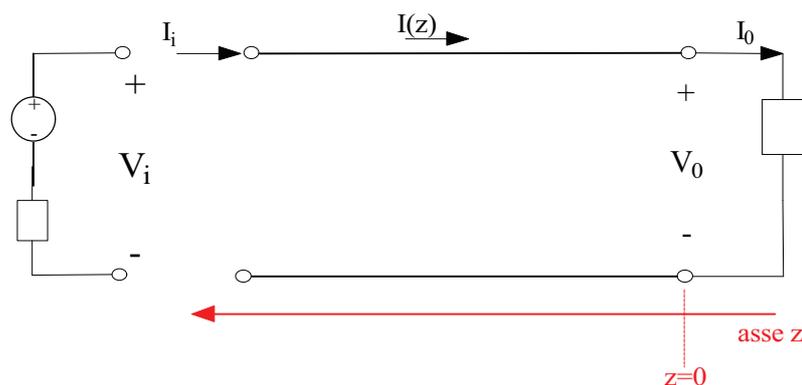
Allora, facendo un po' di passaggi, si trova che le equazioni di V e di I possono essere scritte nella forma

$$\begin{cases} V(z) = C \cosh(\gamma z) + D \sinh(\gamma z) \\ I(z) = \frac{1}{z_c} [-C \sinh(\gamma z) - D \cosh(\gamma z)] \end{cases}$$

Condizioni al contorno

Nelle espressioni di V(z) e I(z) compaiono delle costanti di integrazione C e D (in generale complesse) che vanno determinate sulla base delle **condizioni al contorno** del problema. Vediamo allora quali possono essere queste condizioni al contorno.

Lo schema intuitivo cui fare riferimento è il seguente:



Si osserva subito che, rispetto a quanto considerato fino al paragrafo precedente, l'origine del sistema di riferimento è stata adesso presa sul carico e l'orientazione dell'asse z è quella che va dal carico verso il generatore: è facile verificare che, con questa scelta del sistema di riferimento e nell'ipotesi che la tensione e la corrente sul carico siano rispettivamente $V(z=0) = V_0$ e $I(z=0) = I_0$, le equazioni di V(z) e I(z) diventano

$$\begin{cases} V(z) = V_0 \cosh(\gamma z) + z_c I_0 \sinh(\gamma z) \\ I(z) = \frac{V_0}{z_c} \sinh(\gamma z) + I_0 \cosh(\gamma z) \end{cases}$$

D'ora in poi, salvo diverso avviso, tutti i nostri ragionamenti saranno basati su queste due equazioni.

Osservazione

Facciamo osservare che, se avessimo conservato il riferimento $z=0$ sul generatore, l'orientazione dell'asse z dal generatore verso il carico e le condizioni al contorno $V(z=0) = V_g$ e $I(z=0) = I_g$, le espressioni di $V(z)$ e $I(z)$ sarebbero diventate

$$\begin{cases} V(z) = V_g \cosh(\gamma z) - z_c I_g \sinh(\gamma z) \\ I(z) = \frac{1}{z_c} [-V_g \sinh(\gamma z) + z_c I_g \cosh(\gamma z)] \end{cases}$$

Caso particolare: assenza di perdite ($\alpha=0$)

Vogliamo adesso capire come si modificano le espressioni di $V(z)$ e $I(z)$ se supponiamo che lungo la linea non ci siano perdite (si parla in questo caso di **linea ideale senza perdite**): ciò significa supporre che $\alpha = 0$, ossia che sia nulla la parte reale di $\gamma = \sqrt{z_1 y_2}$.

Vediamo intanto quanto vale nel dettaglio la parte reale di α , in modo da capire perché si parla di “*assenza di perdite*”: dato che avevamo posto

$$\begin{aligned} z_1 &= (r_1 + j\omega\ell) \\ y_2 &= \frac{1}{z_2} = \frac{1}{(r_2 + j\omega c)} \end{aligned}$$

parlare di *perdite nulle* significa ritenere che i termini dissipativi, ossia r_1 e r_2 , siano del tutto trascurabili rispetto ai termini induttivi e capacitivi. In altre parole, parlare di “*perdite nulle*” equivale a supporre che

$$\begin{aligned} r_1 &\ll \omega\ell \\ r_2 &\ll \omega c \end{aligned}$$

Sotto queste ipotesi, risulta evidentemente

$$\begin{aligned} z_1 &= j\omega\ell \\ y_2 &= j\omega c \end{aligned}$$

Da qui scaturisce che la costante di propagazione vale

$$\gamma = \sqrt{z_1 y_2} = \sqrt{-\omega^2 \ell c} = j\omega\sqrt{\ell c}$$

Come previsto, la parte reale di γ è nulla, ossia $\alpha=0$.

Se $\alpha=0$, quindi, risulta $\gamma=j\beta$, ossia γ è un numero immaginario puro, per cui la funzione Coseno Iperbolico coincide con la funzione Coseno, mentre la funzione Seno Iperbolico coincide con la funzione Seno moltiplicata per j . In conclusione, per

una linea senza perdite, le espressioni di $V(z)$ e $I(z)$ si modificano nel modo seguente:

$$\begin{cases} V(z) = V_0 \cos(\beta z) + jz_c I_0 \sin(\beta z) \\ I(z) = \frac{1}{z_c} [jV_0 \sin(\beta z) + z_c I_0 \cos(\beta z)] \end{cases}$$

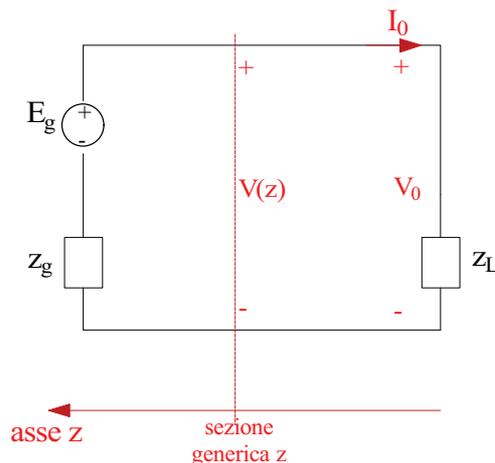
In base a queste equazioni, note la tensione e la corrente in corrispondenza del carico e noti i parametri caratteristici della linea (cioè l'impedenza caratteristica e la costante di fase β), siamo in grado di conoscere la tensione e la corrente in corrispondenza di una qualsiasi sezione z della linea.

Prima di proseguire, riepiloghiamo le relazioni che si hanno nel caso di $\alpha=0$:

$$\begin{cases} z_1 = j\omega l \\ y_2 = j\omega c \\ z_c = \sqrt{\frac{l}{c}} \\ \gamma = j\beta \\ \beta = \omega\sqrt{lc} \end{cases}$$

Impedenza di ingresso

Cominciamo adesso a visualizzare meglio il collegamento del carico con il generatore. Sempre nell'ipotesi che il regime sia sinusoidale, possiamo visualizzare il tutto come un collegamento in serie tra un generatore di tensione alternata, dotato di impedenza interna z_g , ed una impedenza z_L che rappresenta il carico:



Come si evidenzia dallo schema, è chiaro che, se V_0 è la tensione ai capi del carico e I_0 la corrente che risulta attraversare il carico stesso, deve essere $z_L = V_0 / I_0$. Considerate allora le equazioni

$$\begin{cases} V(z) = V_0 \cosh(\gamma z) + z_c I_0 \sinh(\gamma z) \\ I(z) = \frac{V_0}{z_c} \sinh(\gamma z) + I_0 \cosh(\gamma z) \end{cases}$$

si definisce **impedenza di ingresso** della linea, in corrispondenza della sezione z . Il rapporto tra la tensione e la corrente in corrispondenza della sezione stessa, ossia la quantità

$$z_i(z) = \frac{V(z)}{I(z)} = \frac{V_0 \cosh(\gamma z) + z_c I_0 \sinh(\gamma z)}{\frac{V_0}{z_c} \sinh(\gamma z) + I_0 \cosh(\gamma z)}$$

In pratica, il significato della impedenza di ingresso è il seguente: per $z=0$ nel sistema di riferimento adottato, il carico “è visto dalla linea di trasmissione” semplicemente come z_L ; al contrario, quando ci portiamo a distanza z dal carico, vediamo, appunto come carico, non più solo z_L , ma la “cascata” formata da z_L e dal tratto di linea, di lunghezza z , che ancora ci separa da z_L ; di conseguenza, a distanza z da z_L , il carico è visto dalla linea come $z_i(z)$. E' come se, a distanza z da z_L , tracciassimo una sezione ideale trasversale e considerassimo come carico tutto ciò che c'è a destra di tale sezione: tale carico è appunto l'impedenza di ingresso per quella sezione.

Se, adesso, nell'espressione prima ricavata per z_i , moltiplichiamo e dividiamo il denominatore per z_c e, successivamente, dividiamo ambo i membri dell'uguaglianza per I_0 , otteniamo

$$z_i(z) = z_c \frac{\frac{V_0}{I_0} \cosh(\gamma z) + z_c \sinh(\gamma z)}{\frac{V_0}{I_0} \sinh(\gamma z) + z_c \cosh(\gamma z)}$$

Del resto, avendo detto che $z_L = V_0/I_0$, concludiamo che l'impedenza di ingresso è esprimibile come

$$z_i(z) = z_c \frac{z_L \cosh(\gamma z) + z_c \sinh(\gamma z)}{z_L \sinh(\gamma z) + z_c \cosh(\gamma z)}$$

Caso particolare: perdite nulle

Vediamo come cambia l'espressione dell'impedenza di ingresso nel caso in cui si ritengano trascurabili le perdite: abbiamo detto in precedenza che parlare di “assenza di perdite” equivale a supporre che $r_1 \ll \omega \ell$ e $g_2 \ll \omega c$. Da qui scaturisce che

$$\begin{cases} \alpha = 0 \longrightarrow \gamma = j\beta = j\omega\sqrt{\ell c} \\ z_1 = j\omega\ell \\ y_2 = j\omega c \\ z_c = \sqrt{\frac{\ell}{c}} \end{cases}$$

In particolare, ci interessa il fatto che la costante di propagazione $\gamma=j\beta$ diventa un numero immaginario puro: come visto in precedenza, ciò implica che l'andamento di tensione e corrente possa essere descritto dalle equazioni

$$\begin{cases} V(z) = V_0 \cos(\beta z) + jz_c I_0 \sin(\beta z) \\ I(z) = \frac{1}{z_c} [jV_0 \sinh(\beta z) + z_c I_0 \cos(\beta z)] \end{cases}$$

Queste due equazioni si possono porre in forma matriciale nel modo seguente:

$$\begin{bmatrix} V(z) \\ I(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta z) & jz_c \sin(\beta z) \\ j \frac{\sin(\beta z)}{z_c} & \cos(\beta z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ I_0 \end{bmatrix}$$

La matrice di questo sistema prende il nome di **matrice ABCD** e gode evidentemente della proprietà di avere determinante pari ad 1.

Vediamo adesso quanto vale l'impedenza di ingresso in base a quelle nuove relazioni: è facile verificare che essa vale

$$z_i(z) = z_c \frac{z_L \cos(\beta z) + jz_c \sin(\beta z)}{jz_L \sin(\beta z) + z_c \cos(\beta z)}$$

Osservazione: applicazione della matrice ABCD

L'espressione di $V(z)$ e $I(z)$ ottenuta mediante la matrice ABCD consente un calcolo immediato della tensione e della corrente a distanza z dal carico, note che siano la tensione e la corrente in corrispondenza del carico stesso.

Per esempio, supponiamo che, in corrispondenza del carico, risulti $V_0 = 0$: in questo caso, ad una distanza z dal carico, avremo che

$$\begin{bmatrix} V(z) \\ I(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta z) & jz_c \sin(\beta z) \\ j \frac{\sin(\beta z)}{z_c} & \cos(\beta z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_0 \end{bmatrix} \longrightarrow \begin{cases} V(z) = jz_c I_0 \sin(\beta z) \\ I(z) = I_0 \cos(\beta z) \end{cases}$$

In modo del tutto analogo, se fosse $I_0 = 0$, avremmo

$$\begin{bmatrix} V(z) \\ I(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta z) & jz_c \sin(\beta z) \\ j \frac{\sin(\beta z)}{z_c} & \cos(\beta z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ 0 \end{bmatrix} \longrightarrow \begin{cases} V(z) = V_0 \cos(\beta z) \\ I(z) = j \frac{\sin(\beta z)}{z_c} V_0 \sin(\beta z) \end{cases}$$

Valore esatto della costante di propagazione γ in assenza di perdite

Abbiamo in precedenza detto che, in assenza di perdite, possiamo ritenere nullo il valore della costante di attenuazione α (=parte reale di γ). In effetti, questo valore non risulta proprio nullo, per cui vogliamo adesso vedere approssimativamente quanto vale.

Intanto, la definizione di γ ci dice che $\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{z_1 y_2}$. Sostituendo le espressioni dell'impedenza e dell'ammettenza sotto radice, abbiamo

$$\gamma = \sqrt{(r_1 + j\omega\ell)(g_2 + j\omega c)}$$

Mettendo in evidenza nella prima parentesi il termine $j\omega\ell$ e nella seconda il termine $j\omega c$, abbiamo

$$\gamma = \sqrt{-\omega^2 \ell c \left(\frac{r_1}{j\omega\ell} + 1 \right) \left(\frac{g_2}{j\omega c} + 1 \right)} = j\omega\sqrt{\ell c} \sqrt{\left(\frac{r_1}{j\omega\ell} + 1 \right) \left(\frac{g_2}{j\omega c} + 1 \right)}$$

Eseguendo adesso il prodotto sotto radice, abbiamo

$$\gamma = j\omega\sqrt{\ell c} \sqrt{\left(\frac{r_1}{j\omega\ell} \frac{g_2}{j\omega c} \right) + \left(\frac{r_1}{j\omega\ell} + \frac{g_2}{j\omega c} + 1 \right)}$$

Avendo detto che l'ipotesi di assenza di perdite equivale a

$$\begin{aligned} r_1 &\ll \omega\ell \\ g_2 &\ll \omega c \end{aligned}$$

possiamo trascurare il primo prodotto tra parentesi, scrivendo che

$$\gamma = j\omega\sqrt{\ell c} \sqrt{\frac{r_1}{j\omega\ell} + \frac{g_2}{j\omega c} + 1}$$

e possiamo sviluppare la seconda radice in serie: ciò che si ottiene è

$$\gamma = j\omega\sqrt{\ell c} \left(1 + \frac{r_1}{2j\omega\ell} \right) \left(1 + \frac{g_2}{2j\omega c} \right)$$

In questa relazione possiamo separare la parte immaginaria da quella reale: otteniamo

$$\gamma = \sqrt{\ell c} \left(\frac{r_1}{2\ell} + \frac{g_2}{2c} \right) + j\omega\sqrt{\ell c}$$

da cui si deduce che la parte immaginaria è

$$\beta = j\omega\sqrt{\ell c}$$

come avevamo trovato prima, mentre la parte reale è

$$\alpha = \sqrt{\ell c} \left(\frac{r_1}{2\ell} + \frac{g_2}{2c} \right)$$

Questa quantità è evidentemente diversa da zero (anche se di valore estremamente basso). Ricordandoci della definizione di impedenza caratteristica, ossia $z_c = z_1 / \gamma$, abbiamo anche che

$$\alpha = \frac{r_1}{2z_c} + \frac{g_2 z_c}{2}$$

Caso particolare: Condizione di Heavyside

Sulla base delle relazioni trovate nel paragrafo precedente, esaminiamo alcuni casi particolari che si possono incontrare relativamente al valore dei parametri della linea.

Il primo di questi è la cosiddetta **condizione di Heavyside**, che si ha per definizione quando risulta

$$\frac{r_1}{\ell} = \frac{g_2}{c}$$

La particolarità di questa condizione si manifesta nel valore dell'impedenza caratteristica della linea z_c : abbiamo infatti che

$$z_c = \frac{z_1}{\gamma} = \frac{r_1 + j\omega\ell}{\sqrt{(r_1 + j\omega\ell)(g_2 + j\omega c)}} = \sqrt{\frac{r_1 + j\omega\ell}{g_2 + j\omega c}} = \sqrt{\frac{\ell}{c} \frac{r_1/\ell + j\omega}{g_2/c + j\omega}}$$

Avendo detto che $\frac{r_1}{\ell} = \frac{g_2}{c}$, è evidente che risulta

$$z_c = \sqrt{\frac{\ell}{c}} = R_c$$

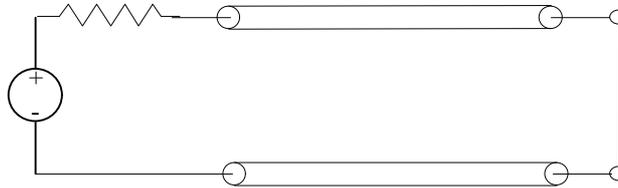
Il rapporto tra una induttanza ed una capacità ha le dimensioni di una resistenza (da cui si spiega il simbolo R_c usato nella formula), per cui quello che abbiamo trovato è che, *nonostante z_1 e z_2 siano delle quantità complesse, in condizioni di Heavyside l'impedenza caratteristica della linea di trasmissione risulta essere puramente resistiva.*

Se andiamo a valutare, inoltre, il valore della costante di attenuazione α , troviamo subito che

$$\alpha = \sqrt{\ell c} \left(\frac{r_1}{2\ell} + \frac{g_2}{2c} \right) = \sqrt{\ell c} \frac{r_1}{\ell} = \frac{r_1 \sqrt{c}}{\sqrt{\ell}} = r_1 \sqrt{\frac{c}{\ell}} = \frac{r_1}{R_c}$$

Caso particolare: carico costituito da cortocircuito

Un altro caso particolare è quello in cui il carico alimentato dal generatore è costituito da un **cortocircuito**, il che equivale a $z_L=0$:



Se andiamo a valutare l'impedenza di ingresso, alla generica sezione z , usando la relazione

$$z_i = z_c \frac{z_L \cosh(\gamma z) + z_c \sinh(\gamma z)}{z_L \sinh(\gamma z) + z_c \cosh(\gamma z)}$$

relativa alla presenza di perdite sulla linea, troviamo che

$$z_i = z_c \frac{z_c \sinh(\gamma z)}{z_c \cosh(\gamma z)} = z_c \operatorname{tgh}(\gamma z)$$

Se, invece, supponiamo non ci siano perdite sulla linea, la formula da usare è

$$z_i = z_c \frac{z_L \cos(\beta z) + j z_c \sin(\beta z)}{j z_L \sinh(\beta z) + z_c \cos(\beta z)}$$

e quindi si trova, per $z_L=0$, che

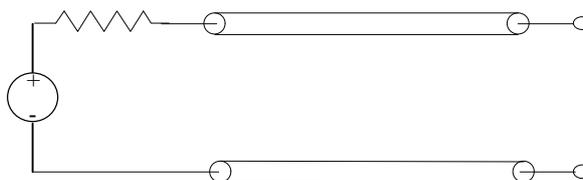
$$z_i = z_c \frac{j z_c \sin(\beta z)}{z_c \cos(\beta z)} = j z_c \operatorname{tg}(\beta z)$$

Se, oltre alla assenza di perdite, ci mettiamo anche nella condizione di Heavyside, sappiamo che $z_c=R_c$, per cui abbiamo che l'impedenza di ingresso vale

$$z_i = j R_c \operatorname{tg}(\beta z)$$

Caso particolare: carico costituito da un circuito aperto

L'altro caso particolare riguardante il carico è quello in cui si tratta di un **circuito aperto**, il che equivale a $z_L=\infty$:



Usando sempre la relazione generale

$$z_i = z_c \frac{z_L \cosh(\gamma z) + z_c \sinh(\gamma z)}{z_L \sinh(\gamma z) + z_c \cosh(\gamma z)}$$

possiamo mettere in evidenza z_L in entrambi i membri, ottenendo

$$z_i = z_c \frac{z_L \left(\cosh(\gamma z) + \frac{z_c}{z_L} \sinh(\gamma z) \right)}{z_L \left(\sinh(\gamma z) + \frac{z_c}{z_L} \cosh(\gamma z) \right)}$$

da cui si ricava, se $z_L = \infty$, che

$$z_i = z_c \frac{(\cosh(\gamma z))}{(\sinh(\gamma z))} = z_c \operatorname{ctgh}(\gamma z)$$

Se, invece, supponiamo non ci siano perdite sulla linea, per cui usiamo la relazione

$$z_i = z_c \frac{z_L \cos(\beta z) + j z_c \sin(\beta z)}{j z_L \sinh(\beta z) + z_c \cos(\beta z)}$$

troviamo, con metodo analogo a prima, che

$$z_i = z_c \frac{z_c \cos(\beta z)}{j z_c \sin(\beta z)} = \frac{z_c}{j} \operatorname{ctg}(\beta z)$$

Infine, se, oltre alla assenza di perdite, ci mettiamo nella condizione di Heavyside, sappiamo che $z_c = R_c$, per cui abbiamo che l'impedenza di ingresso vale

$$z_i = \frac{R_c}{j} \operatorname{ctg}(\beta z)$$

Riepiloghiamo nello schema seguente i risultati ottenuti negli ultimi due paragrafi a proposito dell'impedenza di ingresso:

$$\begin{array}{l}
 z_L = 0 \longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{presenza di perdite} \longrightarrow z_i = z_c \operatorname{tgh}(\gamma z) \\ \text{assenza di perdite} \longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} z_i = j z_c \operatorname{tg}(\beta z) \\ \text{cond. Heavyside} \longrightarrow z_i = j R_c \operatorname{tg}(\beta z) \end{array} \right. \end{array} \right. \\
 \\
 z_L = \infty \longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{presenza di perdite} \longrightarrow z_i = z_c \operatorname{ctgh}(\gamma z) \\ \text{assenza di perdite} \longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} z_i = \frac{z_c}{j} \operatorname{ctg}(\beta z) \\ \text{cond. Heavyside} \longrightarrow z_i = \frac{R_c}{j} \operatorname{ctg}(\beta z) \end{array} \right. \end{array} \right.
 \end{array}$$

N.B. Si osserva che facendo il prodotto tra i valori di impedenza di ingresso ottenuti, in condizione di Heavyside ed in assenza di perdite, per il cortocircuito e per il circuito aperto, si ottiene esattamente R_C^2

Diagrammi della tensione e della corrente in assenza di perdite

Vogliamo adesso studiare l'andamento della tensione e della corrente lungo la linea di trasmissione al variare del carico, rappresentato sempre dalla generica impedenza z_L .

Le espressioni di $V(z)$ e $I(z)$ cui dobbiamo fare riferimento sono le seguenti:

$$\text{in presenza di perdite sulla linea} \rightarrow \begin{cases} V(z) = V_0 \cosh(\gamma z) + z_C I_0 \sinh(\gamma z) \\ I(z) = \frac{V_0}{z_C} \sinh(\gamma z) + I_0 \cosh(\gamma z) \end{cases}$$

$$\text{in assenza di perdite sulla linea} \rightarrow \begin{cases} V(z) = V_0 \cos(\beta z) + j z_C I_0 \sin(\beta z) \\ I(z) = j \frac{V_0}{z_C} \sin(\beta z) + I_0 \cos(\beta z) \end{cases}$$

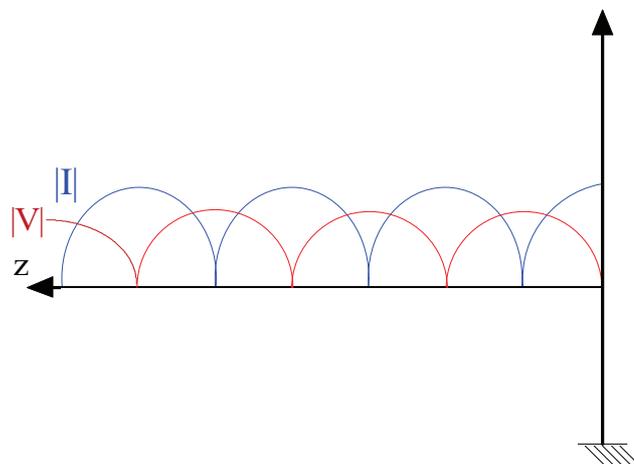
In particolare, ci riferiremo al caso di assenza di perdite sulla linea.

1° caso: carico costituito da un cortocircuito

Cominciamo dal caso in cui $z_L=0$: ricordando che, in corrispondenza del carico, risulta $V_0=z_L I_0$, la condizione $z_L=0$ equivale a $V_0=0$, per cui abbiamo che

$$\begin{cases} V(z) = j z_C I_0 \sin(\beta z) \\ I(z) = I_0 \cos(\beta z) \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} |V(z)| = |j z_C I_0 \sin(\beta z)| = |z_C| I_0 |\sin(\beta z)| = |z_C| I_0 |\sin(\beta z)| \\ |I(z)| = |I_0 \cos(\beta z)| = I_0 |\cos(\beta z)| \end{cases}$$

Possiamo dunque tracciare i diagrammi (in funzione ovviamente di z) del modulo della tensione e di quello della corrente:



N.B. Ricordiamo di non far caso al fatto per cui il modulo della corrente abbia valore massimo maggiore di quello della tensione, in quanto i diagrammi sono solo qualitativi.

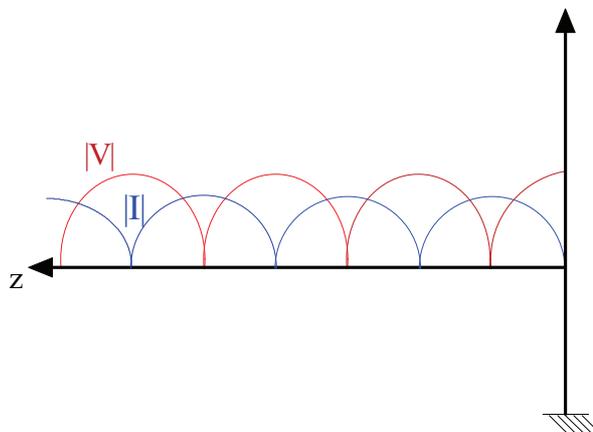
La cosa principale che si evidenzia dal diagramma è che, nel caso del carico in cortocircuito, i valori massimi della corrente si hanno in corrispondenza dei valori minimi della tensione e viceversa. Ciò è confermato dai valori di V e I che si hanno in corrispondenza proprio del carico: trattandosi di un cortocircuito, è chiaro che la tensione assume valore minimo, $V_0=0$, mentre la corrente, non trovando resistenze di nessun tipo, assume il suo valore massimo $|I_{MAX}| = |I_0|$.

2° caso: carico costituito da un circuito aperto

In questo caso, essendo $z_L = \infty$, abbiamo che $I_0 = 0$, per cui, analiticamente, la situazione è la seguente:

$$\begin{cases} V(z) = V_0 \cos(\beta z) \\ I(z) = j \frac{V_0}{z_C} \sin(\beta z) \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} |V(z)| = V_0 \cos(\beta z) \\ |I(z)| = \left| j \frac{V_0}{z_C} \sin(\beta z) \right| = \left| \frac{j}{z_C} \right| V_0 \sin(\beta z) = \left| \frac{1}{z_C} \right| V_0 \sin(\beta z) \end{cases}$$

I diagrammi di tensione e corrente risultano perciò semplicemente invertiti rispetto al caso precedente:



Si ha dunque che, in corrispondenza del carico, la tensione assume valore massimo $|V_{MAX}| = |V_0|$, mentre la corrente, trovando una resistenza infinita, assume il valore minimo $|I_0| = 0$.

3° caso: carico adattato

Un caso di particolare importanza è quello cosiddetto di **carico adattato**, che si ha quando il valore della impedenza che rappresenta il carico è reale e precisamente vale

$$z_L = R_C = \sqrt{\frac{\ell}{c}}$$

dove R_C è il valore dell'impedenza caratteristica della linea in condizioni di Heavyside, ossia quando le perdite sulla linea sono supposte nulle e quando si ha che $\frac{r_1}{\ell} = \frac{g_2}{c}$.

Consideriamo sempre l'equazione delle linee di trasmissione per perdite nulle:

$$\begin{cases} V(z) = V_0 \cos(\beta z) + j z_C I_0 \sin(\beta z) \\ I(z) = j \frac{V_0}{z_C} \sin(\beta z) + I_0 \cos(\beta z) \end{cases}$$

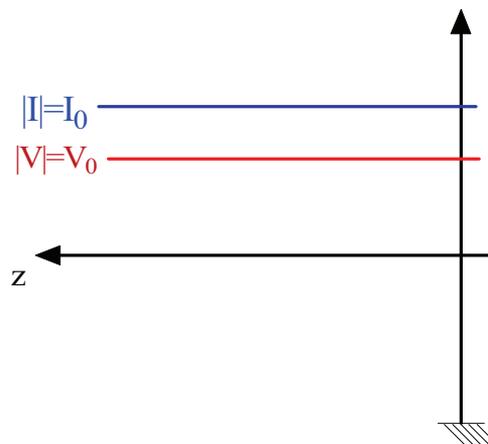
Avendo supposto che $z_L = z_C = R_C$ ed essendo $V_0 = z_L I_0$, le equazioni diventano

$$\begin{cases} V(z) = V_0 \cos(\beta z) + j V_0 \sin(\beta z) = V_0 (\cos(\beta z) + j \sin(\beta z)) \\ I(z) = j I_0 \sin(\beta z) + I_0 \cos(\beta z) = I_0 (\cos(\beta z) + j \sin(\beta z)) \end{cases}$$

Possiamo esprimere in modo più comodo queste due equazioni sfruttando le formule di Eulero: è infatti immediato verificare che esse sono equivalenti a

$$\begin{cases} V(z) = V_0 e^{j\beta z} \\ I(z) = I_0 e^{j\beta z} \end{cases}$$

Ciò che si deduce da queste formule è che manca, sia nell'onda di tensione sia in quella di corrente, l'onda riflessa (come d'altra parte era logico aspettarsi, visto che sono state supposte nulle le perdite e tali perdite sono dovute proprio all'onda riflessa). Abbiamo cioè un'onda puramente progressiva di tensione e un'onda puramente progressiva di corrente. Ciò significa che il modulo dell'onda risulta costante man mano che ci si sposta spazialmente, per cui i diagrammi dei moduli di $V(z)$ e $I(z)$ diventano i seguenti:



Quella appena descritta è appunto la condizione di **adattamento del carico**. In tale condizione, tutta la potenza fornita dal generatore viene trasferita al carico senza alcuna perdita: i valori numerici sono chiaramente

$$\begin{aligned} |V_{\text{MAX}}| &= |V_0| = |R_C I_0| \\ |I_{\text{MAX}}| &= |I_0| \end{aligned}$$

Valutazione analitica dei diagrammi di tensione e corrente

Vediamo adesso di fare considerazioni matematiche che ci diano gli stessi risultati che fino ad ora abbiamo dato per via qualitativa. Consideriamo sempre le equazioni delle linee di trasmissione in assenza di perdite:

$$\begin{cases} V(z) = V_0 \cos(\beta z) + j z_C I_0 \sin(\beta z) \\ I(z) = j \frac{V_0}{z_C} \sin(\beta z) + I_0 \cos(\beta z) \end{cases}$$

Supponiamo anche di essere in condizioni di Heavyside, per cui $z_C = R_C = \sqrt{\frac{\ell}{c}}$: le equazioni diventano

$$\begin{cases} V(z) = V_0 \cos(\beta z) + j R_C I_0 \sin(\beta z) \\ I(z) = j \frac{V_0}{R_C} \sin(\beta z) + I_0 \cos(\beta z) \end{cases}$$

Adesso, se supponiamo che il carico sia puramente resistivo, possiamo porre $z_L = R$. Allora, essendo $V_0 = z_L I_0 = R I_0$, possiamo ulteriormente modificare le equazioni, ottenendo

$$\begin{cases} V(z) = V_0 \cos(\beta z) + j R_C \frac{V_0}{R} \sin(\beta z) \\ I(z) = j R \frac{I_0}{R_C} \sin(\beta z) + I_0 \cos(\beta z) \end{cases}$$

Andiamo a calcolarci i moduli di $V(z)$ e $I(z)$ sfruttando queste relazioni: intanto, applicando semplicemente l'operatore "modulo", possiamo riscrivere

$$\begin{cases} |V(z)| = |V_0| \left| \cos(\beta z) + j \frac{R_C}{R} \sin(\beta z) \right| \\ |I(z)| = |I_0| \left| j \frac{R}{R_C} \sin(\beta z) + \cos(\beta z) \right| \end{cases}$$

In ciascuna equazione abbiamo a secondo membro il prodotto tra il modulo di una costante, cioè rispettivamente V_0 e I_0 , ed il modulo di un numero complesso: applicando allora la definizione di modulo di un numero complesso, abbiamo che

$$\begin{cases} |V(z)| = |V_0| \sqrt{(\cos(\beta z))^2 + \left(\frac{R_c}{R} \sin(\beta z)\right)^2} \\ |I(z)| = |I_0| \sqrt{(\cos(\beta z))^2 + \left(\frac{R}{R_c} \sin(\beta z)\right)^2} \end{cases}$$

E' chiaro che tutto dipende, in entrambe le equazioni, dal termine sotto radice, visto che è l'unico che dipende a sua volta dalla coordinata z .

Il primo caso che consideriamo è quello in cui $R \ll R_c$: in questa situazione, il valore della frazione R_c/R è molto elevato, mentre quello della frazione R/R_c è molto piccolo; allora, nella prima equazione possiamo trascurare il coseno e nella seconda possiamo trascurare il seno, in modo da ottenere

$$\begin{cases} |V(z)| = |V_0| \frac{R_c}{R} \sin(\beta z) \\ |I(z)| = |I_0| \cos(\beta z) \end{cases}$$

Consideriamo in particolare il modulo della tensione: il suo valore massimo è $V_{MAX} = V_0 \frac{R_c}{R}$ e si ottiene quando il seno vale 1, ossia quando l'argomento βz del seno è un multiplo intero dispari $\pi/2$: in termini analitici, deve accadere dunque che

$$\beta z = (2m+1) \frac{\pi}{2}$$

ossia che $z = (2m+1) \frac{\pi}{2\beta}$.

Se indichiamo con λ la lunghezza d'onda dell'onda di tensione, essa è legata alla costante di fase β dalla relazione $\beta = 2\pi/\lambda$: sostituendo questa espressione di β nell'espressione di z prima trovato si ottiene che

$$z_{MAX} = (2m+1) \frac{\lambda}{4}$$

Quindi, in corrispondenza di questi valori della coordinata z , otteniamo i valori massimi del modulo della tensione. Vediamo allora quali sono i valori del modulo della corrente in corrispondenza di questi z_{MAX} : l'espressione del modulo della corrente era $|I(z)| = |I_0| \cos(\beta z)$ ed è subito chiaro che $|I(z)|$ si annulla in quegli stessi punti dove $|V(z)|$ è massimo: infatti, nei punti in cui il Seno vale 1, il coseno è nullo.

Abbiamo dunque trovato una conferma matematica del fatto che, *quando il carico ha un valore piccolo (rispetto all'impedenza caratteristica della linea), i valori massimi della tensione si ottengono in corrispondenza dei valori minimi della corrente.*

Adesso vediamo quando si ottengono i valori minimi della tensione: dato che

$$|V(z)| = |V_0| \frac{R_C}{R} \text{sen}(\beta z)$$

è chiaro che $|V(z)|$ è minimo, ossia vale 0, quando vale 0 il seno, ossia quando $\beta z = n\pi$, ossia quando $z = n\pi/\beta$, ossia infine quando

$$z_{\text{MIN}} = \frac{n}{2} \lambda$$

Con considerazioni analoghe a prima, è chiaro che, in corrispondenza di questi stessi valori di z , si ottengono i valori massimi della corrente, ossia $I_{\text{MAX}} = I_0$. Anche questa è una conferma analitica della considerazioni qualitative fatte prima.

Passiamo al caso in cui $R \gg R_C$: questa volta, il valore della frazione R_C/R è molto piccolo, mentre quello della frazione R/R_C è molto grande; allora, nella espressione di $|V(z)|$ possiamo trascurare il seno e nella espressione di $|I(z)|$ possiamo trascurare il coseno, in modo da ottenere

$$\begin{cases} |V(z)| = |V_0| \cos(\beta z) \\ |I(z)| = |I_0| \frac{R}{R_C} \text{sen}(\beta z) \end{cases}$$

E' abbastanza facile intuire come il discorso vada semplicemente invertito rispetto al caso precedente: il valore massimo del modulo della corrente, ossia $I_{\text{MAX}} = I_0 \frac{R}{R_C}$, si ottiene per $z_{\text{MAX}} = \frac{m}{2} \lambda$ ed in corrispondenza del valore minimo (=0) della tensione. Viceversa, il valore minimo (=0) della corrente si ottiene per $z_{\text{MIN}} = (2n+1) \frac{\lambda}{4}$ ed in corrispondenza del valore massimo della tensione, che vale $V_{\text{MAX}} = V_0$.

Per concludere, si nota che, nel caso in cui $R \gg R_C$, il valore massimo di tensione ed il valore minimo di corrente si ottengono proprio in corrispondenza del carico: infatti, le relazioni da considerare sono

$$\begin{cases} |V(z)| = |V_0| \cos(\beta z) \\ |I(z)| = |I_0| \frac{R}{R_C} \text{sen}(\beta z) \end{cases}$$

e i valori rispettivamente massimo e minimo si ottengono per $z=0$.

Rapporto d'onda stazionario

Una delle più importanti quantità misurabili sulle linee di trasmissione è il cosiddetto **rapporto d'onda stazionario**, definito come il rapporto tra il valore massimo ed il valore minimo del modulo della tensione o della corrente:

$$\boxed{\text{ROS} = \frac{|V(z)|_{\text{MAX}}}{|V(z)|_{\text{MIN}}} = \frac{|I(z)|_{\text{MAX}}}{|I(z)|_{\text{MIN}}}}$$

In base a quanto visto poco fa, abbiamo due possibilità a seconda del valore del carico alimentato dalla linea:

$$\text{se } R \ll R_C \rightarrow \begin{matrix} V_{\text{MAX}} = V_0 \frac{R_C}{R} \\ V_{\text{MIN}} = V_0 \end{matrix} \longrightarrow \text{ROS} = \frac{R_C}{R}$$

$$\text{se } R \gg R_C \rightarrow \begin{matrix} I_{\text{MAX}} = I_0 \frac{R}{R_C} \\ I_{\text{MIN}} = I_0 \end{matrix} \longrightarrow \text{ROS} = \frac{R}{R_C}$$

In ogni caso, risulta **ROS > 1**.

Inoltre, è chiaro che, in base a quelle due relazioni, se noi riusciamo a misurare la tensione o la corrente lungo la linea, per cui possiamo conoscere il valore del ROS, e conosciamo inoltre il valore di R_C , siamo in grado di valutare il valore della resistenza di carico R .

Diagrammi dell'impedenza di ingresso

Le linee di trasmissione sono state fino ad ora esaminate essenzialmente come mezzo di trasporto di energia da un punto ad un altro, tipicamente da un apparato di generazione ad un carico. Tuttavia, *nel campo delle microonde, esse sono molto importanti anche come veri e propri elementi circuitali*. Il motivo è il seguente: quando si costruiscono dei dispositivi che lavorino con frequenze superiori ai 150 MHz, è difficile realizzare normali elementi circuitali (resistori, induttori, generatori e così via) che si possano ancora considerare a parametri concentrati, per cui risulta necessario adottare l'ipotesi dei parametri distribuiti e quindi considerare anche la presenza delle linee di trasmissione; per considerare tali linee, dato che le dimensioni fisiche delle sezioni di linea sono sufficientemente piccole, è possibile vederle proprio come degli elementi circuitali. Da qui viene la necessità di studiare il comportamento circuitale di queste linee per valori di lunghezza confrontabili con la lunghezza d'onda delle onde che devono trasportare.

Il punto di partenza è ancora una volta costituito dalle equazioni delle linee di trasmissione in assenza di perdite:

$$\begin{cases} V(z) = V_0 \cos(\beta z) + jz_C I_0 \sin(\beta z) \\ I(z) = j \frac{V_0}{z_C} \sin(\beta z) + I_0 \cos(\beta z) \end{cases}$$

In precedenza, abbiamo già esaminato cosa accade alla impedenza di ingresso $z_i(z) = \frac{V(z)}{I(z)}$, in corrispondenza di una generica distanza z dal carico, quando il

carico stesso z_L è costituito da un cortocircuito o da un circuito aperto: in particolare, abbiamo trovato che

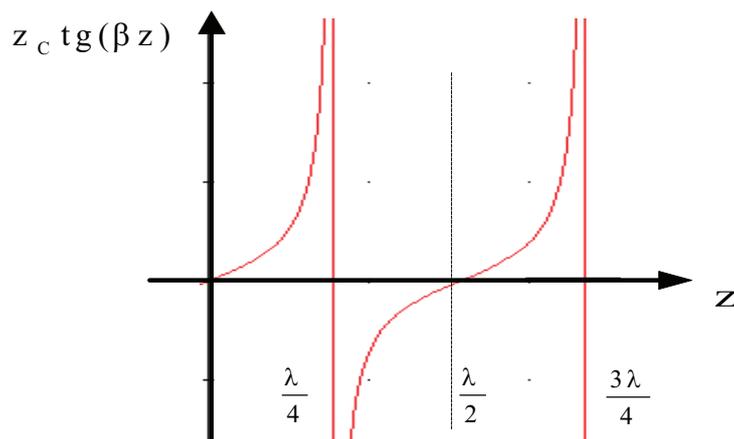
$$\text{se } z_L=0 \text{ (cortocircuito)} \quad \rightarrow \quad z_i = jz_c \operatorname{tg}(\beta z)$$

$$\text{se } z_L=\infty \text{ (circuito aperto)} \quad \rightarrow \quad z_i = -jz_c \operatorname{ctg}(\beta z)$$

Allora, è chiaro che z_i non risulta mai resistiva (in quanto manca comunque della parte reale) e può risultare induttiva o capacitiva a seconda del segno del coefficiente della parte immaginaria: essa risulta induttiva se il segno è positivo, mentre risulta capacitiva in caso contrario.

Possiamo perciò provare a diagrammare i valori del coefficiente della parte immaginaria di z_i , nei due casi, in funzione di z , proprio allo scopo di vedere che carattere (capacitivo o induttivo) ha l'impedenza di ingresso al variare della distanza z cui ci poniamo dal carico.

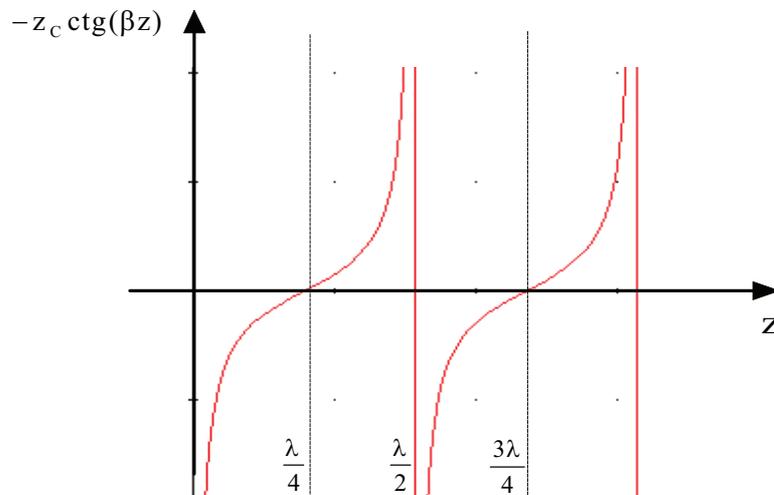
Come primo diagramma riportiamo il coefficiente della parte immaginaria della relazione $z_i = jz_c \operatorname{tg}(\beta z)$, ossia l'andamento della **reattanza di ingresso** (=coefficiente della parte immaginaria della impedenza di ingresso) quando il carico è un semplice cortocircuito:



Questo grafico mostra quanto segue:

- quando siamo a distanza $z < \lambda/4$, la reattanza di ingresso è positiva, ossia è di natura induttiva;
- quando siamo a distanza $\lambda/4 < z < \lambda/2$, la reattanza di ingresso è negativa, ossia di natura capacitiva;
- quando siamo a distanza $z = \lambda/2$, la reattanza di ingresso è nulla, il che significa che la linea di lunghezza $\lambda/2$ si comporta come un cortocircuito;
- a partire da $\lambda/2$ il discorso si ripete ogni tratto di lunghezza $\lambda/2$;
- infine, la reattanza di ingresso va all'infinito a distanza $\frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4}, \dots, \frac{(2k+1)\lambda}{4}$

Nel secondo grafico riportiamo adesso l'andamento di $-z_c \text{ctg}(\beta z)$ in funzione del valore di z : otteniamo



In questo caso, si osserva quanto segue:

- a distanza $z < \lambda/4$, la reattanza di ingresso è negativa, ossia è di natura capacitiva;
- a distanza $z = \lambda/4$, la reattanza di ingresso si annulla;
- a distanza $\lambda/4 < z < \lambda/2$, la reattanza di ingresso è positiva, cioè induttiva;
- a distanza $z = \lambda/2$, la reattanza di ingresso va all'infinito e lo fa in tutte le distanze multiple intere di $\lambda/2$;
- a partire da $\lambda/2$ il discorso si ripete ogni tratto di lunghezza $\lambda/2$.

In generale, quindi, se esaminiamo l'andamento complessivo (periodico) di questi diagrammi della reattanza di ingresso, possiamo affermare che, a seconda della distanza z dal carico (che è un corto oppure un circuito aperto) alla quale ci poniamo, possiamo vedere (guardando verso il carico) una induttanza oppure una capacità. Ecco, allora, che *una linea di trasmissione, "chiusa" su un cortocircuito o su un circuito aperto, può essere usata come un induttore o un condensatore a seconda della lunghezza della linea stessa.*

Particolare attenzione bisogna fare quando abbiamo un valore infinito (sia positivo sia negativo) della reattanza di ingresso: in base ai diagrammi appena visti, abbiamo, per esempio, valore infinito quando la linea in cortocircuito è lunga $\lambda/4$ oppure quando la linea aperta in corto è lunga $\lambda/2$. In questi casi, è assolutamente necessario prendere in considerazione la parte resistiva dell'impedenza, la quale solo in teoria risulta nulla, mentre nella pratica ha un valore non nullo. Questo corrisponde alla condizione di un circuito a parametri concentrati che si trovi in condizioni di **risonanza parallelo**, il quale, per basse frequenze, presenta infatti una impedenza infinita se si trascura la resistenza.

Nei casi concreti, dunque, la parte resistiva dell'impedenza di ingresso non può essere trascurata: si può dimostrare che essa vale

$$R = \frac{2z_c^2}{r_1 L}$$

dove r_1 è la resistenza serie per unità di lunghezza della linea, z_c è l'impedenza di ingresso della linea ed L la lunghezza della linea stessa, che, come visto prima, deve essere un multiplo dispari di $\lambda/4$ se la linea è in corto o un multiplo pari di $\lambda/4$ se la linea è aperta.

Concludiamo osservando che l'espressione di R appena fornita risulta valida solo sotto due ipotesi fondamentali:

- la prima è che valgano le seguenti relazioni, in base alle quali la quantità αL deve essere piuttosto piccola:

$$\cosh(\alpha L) \cong 1$$

$$\sinh(\alpha L) \cong \alpha L$$

- la seconda è che si possa trascurare il valore di g_2 , in modo da poter scrivere che

$$\alpha = \frac{r_1}{2z_c}$$

Linea di lunghezza $\lambda/4$ come invertitore di impedenza

Consideriamo ancora una volta le equazioni delle linee di trasmissione ottenute prendendo come riferimento per l'asse z il punto in cui c'è il carico e nell'ipotesi di assenza di perdite:

$$\begin{cases} V(z) = V_0 \cos(\beta z) + jz_c I_0 \sin(\beta z) \\ I(z) = I_0 \cos(\beta z) + j\frac{V_0}{z_c} \sin(\beta z) \end{cases}$$

Ricordiamo che V_0 ed I_0 sono i valori della tensione e della corrente relativi al carico e che z_c è l'impedenza caratteristica della linea, definita come $z_c = z_1 / \gamma$.

Abbiamo già definito l'impedenza di ingresso alla sezione z come il rapporto, fissato un certo valore della distanza z dal carico, tra la tensione e la corrente sulla linea:

$$z_i = \frac{V(z)}{I(z)} = z_c \frac{z_L \cos(\beta z) + jz_c \sin(\beta z)}{z_c \cos(\beta z) + jz_L \sin(\beta z)}$$

Questa può anche essere riscritta ponendo in evidenza, al posto dell'impedenza caratteristica della linea z_c , l'impedenza z_L che rappresenta il carico:

$$z_i = \frac{z_L \cos(\beta z) + jz_c \sin(\beta z)}{\cos(\beta z) + j\frac{z_L}{z_c} \sin(\beta z)} = z_L \frac{\cos(\beta z) + j\frac{z_c}{z_L} \sin(\beta z)}{\cos(\beta z) + j\frac{z_L}{z_c} \sin(\beta z)}$$

Vediamo allora quanto vale questa impedenza di ingresso se la calcoliamo a distanza $z=\lambda/4$ dal carico, dove λ è la lunghezza d'onda del segnale che si propaga lungo la linea: sostituendo questa espressione di z otteniamo

$$z_i = z_L \frac{\cos\left(\beta \frac{\lambda}{4}\right) + j \frac{z_C}{z_L} \operatorname{sen}\left(\beta \frac{\lambda}{4}\right)}{\cos\left(\beta \frac{\lambda}{4}\right) + j \frac{z_L}{z_C} \operatorname{sen}\left(\beta \frac{\lambda}{4}\right)}$$

La costante di fase β è legata alla lunghezza d'onda del segnale dalla relazione $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$, dalla quale si ricava che $\beta\lambda = 2\pi$ ed anche, quindi, che $\beta \frac{\lambda}{4} = \frac{\pi}{2}$. Andando dunque a sostituire nella espressione dell'impedenza di ingresso, è chiaro che, in $\pi/2$, il coseno si annulla mentre il seno vale 1, per cui abbiamo che

$$z_i\left(z = \frac{\lambda}{4}\right) = z_L \frac{j \frac{z_C}{z_L}}{j \frac{z_L}{z_C}} = \frac{z_C^2}{z_L}$$

Abbiamo dunque trovato che ad una distanza di $\lambda/4$ dal carico, l'impedenza di ingresso è pari al rapporto tra il quadrato dell'impedenza caratteristica e l'impedenza del carico.

Nell'ipotesi ulteriore per cui sia

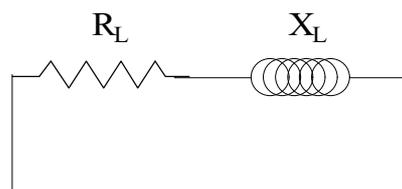
$$\begin{cases} z_C = R_C \\ z_L = R_L + jX_L \end{cases}$$

abbiamo evidentemente che

$$z_i\left(z = \frac{\lambda}{4}\right) = \frac{R_C^2}{R_L + jX_L} = \frac{1}{\frac{R_L}{R_C^2} + j \frac{X_L}{R_C^2}}$$

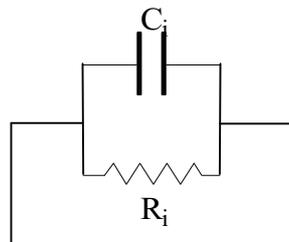
Questa relazione significa quanto segue:

- quando $z=0$, il carico è rappresentato semplicemente da $z_L=R_L+jX_L$ e può quindi essere schematizzato come la serie tra una resistenza ed una induttanza:



- al contrario, a distanza $z=\lambda/4$, il carico, rappresentato adesso non più da z_L ma dall'impedenza di ingresso z_i (la quale tiene conto, oltre che del carico vero e proprio z_L , anche del tratto di linea di lunghezza $\lambda/4$), è costituito da un parallelo tra una resistenza $R_i = \frac{R_C^2}{R_L}$ ed una capacità

$$X_i = -\frac{R_C^2}{X_L} :$$



Da qui deriva il termine **invertitore di impedenza** attribuito al tratto di linea di linea lungo $\lambda/4$: mentre il carico z_L è di natura ohmico-induttiva (serie), il carico visto da una distanza $L=\lambda/4$ diventa ohmico-capacitivo (parallelo).

Osservazione

Consideriamo sempre l'espressione dell'impedenza di ingresso, vista in corrispondenza della generica sezione z , per una linea priva di perdite:

$$z_i(z) = \frac{z_L \cos(\beta z) + j z_C \sin(\beta z)}{\cos(\beta z) + j \frac{z_L}{z_C} \sin(\beta z)}$$

Ricordando che $\beta=2\pi/\lambda$, ci si rende conto facilmente che $z_i(z)$ è costante e pari all'impedenza di carico z_L se consideriamo una sezione di linea a distanza dal carico multipla di $\lambda/2$: infatti, prendendo $z=n\lambda/2$, risulta $\beta z=n\pi$, per cui i termini Coseno risultano pari a ± 1 mentre in termini Seno si annullano.

In modo del tutto analogo, se valutiamo l'impedenza di ingresso in corrispondenza di una arbitraria sezione z_1 e poi ripetiamo il calcolo per una sezione z_2 che si trovi ad una distanza da z_1 pari ad un multiplo di $\lambda/2$, otteniamo ancora la stessa impedenza. Anche qui il motivo è nell'espressione $\beta=2\pi/\lambda$.

Questa proprietà ha come conseguenza evidente il fatto che, data una linea di assegnata lunghezza, essa mantiene la stessa impedenza di ingresso, in qualsiasi sezione, anche se le aggiungiamo o sottraiamo tratti di linea, purché lunghi un multiplo di $\lambda/2$.

Coefficiente di riflessione sul carico

Spesso sorge il problema di collegare due o più linee di trasmissione in cascata: l'effetto di questo collegamento è quello di introdurre una **discontinuità** tra due linee uniformi. In base alle *leggi di Kirchoff*, però, la tensione e la corrente totale devono rimanere continue attraverso la discontinuità. Abbiamo anche visto che la tensione totale di una linea si può considerare come la somma di un'onda diretta che viaggia nel verso positivo del riferimento prescelto e di un'onda riflessa che viaggia nel verso negativo. Supponiamo allora che l'onda diretta valga V_i nel punto di discontinuità e che quella riflessa valga invece V_r . Vediamo, sulla base di questo, come possiamo modificare l'equazione delle linee di trasmissione.

Consideriamo il caso generico della presenza di perdite e prendiamo come riferimento dell'asse z il punto in cui si trova il carico: sappiamo che, sotto queste ipotesi, l'andamento della tensione e della corrente lungo z è definito dalle relazioni

$$\begin{cases} V(z) = V_i e^{\gamma z} + V_r e^{-\gamma z} \\ I(z) = \frac{V_i}{z_c} e^{\gamma z} - \frac{V_r}{z_c} e^{-\gamma z} \end{cases}$$

dove ricordiamo ancora una volta che $\gamma = \alpha + j\beta$ è la costante di propagazione e z_c l'impedenza caratteristica della linea considerata.

Per determinare le costanti V_i e V_r (in generale complesse), sappiamo di dover imporre le condizioni al contorno relative ad una qualsiasi sezione della linea; la scelta più semplice è quella di considerare la sezione di carico, ossia $z=0$: le condizioni al contorno sul carico sono i valori di tensione $V(0)=V_0$ e di corrente $I(0)=I_0$, per cui valgono le relazioni

$$\begin{cases} V(z=0) = V_0 = V_i + V_r \\ I(z=0) = I_0 = \frac{V_i}{z_c} - \frac{V_r}{z_c} \end{cases}$$

Si definisce allora **coefficiente di riflessione sul carico** il seguente rapporto:

$$\rho_L = \frac{V_r}{V_i}$$

Considerando che V_i e V_r sono, in generale, delle costanti complesse, deduciamo che anche ρ_L è una quantità complessa, dotata cioè di un proprio modulo e di una propria fase: $\rho_L = |\rho_L| \langle \theta \rangle$.

E' possibile esprimere questo coefficiente in funzione solo dell'impedenza caratteristica della linea z_c e dell'impedenza z_L che rappresenta il carico: per prima cosa, dalle relazioni

$$\begin{cases} V_0 = V_i + V_r \\ I_0 = \frac{V_i}{z_c} - \frac{V_r}{z_c} \end{cases}$$

otteniamo facilmente che

$$\begin{cases} V_i = V_0 - V_r \\ I_0 = \frac{1}{z_c} [(V_0 - V_r) - V_r] \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} V_i = \frac{V_0 + z_c I_0}{2} \\ V_r = \frac{V_0 - z_c I_0}{2} \end{cases}$$

Allora, applicando la definizione data per ρ_L , abbiamo che

$$\rho_L = \frac{V_r}{V_i} = \frac{V_0 - z_c I_0}{V_0 + z_c I_0}$$

Da qui, dividendo ambo i membri per I_0 e ricordando che $V_0 = z_L I_0$, si ricava che

$$\rho_L = \frac{z_L - z_c}{z_L + z_c}$$

Si deduce che, a parità di linea di trasmissione (ossia a parità di z_c) il coefficiente di riflessione dipende solo dal carico z_L .

Facciamo notare che l'espressione di ρ_L appena ricavata vale comunque venga preso il sistema di riferimento e qualunque sia il regime di tensione e di corrente presente sulla linea.

Coefficiente di trasmissione sul carico

Dalla relazione $\rho_L = \frac{z_L - z_c}{z_L + z_c}$ si deduce una cosa importante: nel caso in cui l'impedenza di carico z_L risulti esattamente pari all'impedenza caratteristica z_c , il coefficiente di riflessione risulta nullo e quindi vale zero anche V_r , cioè appunto l'onda riflessa.

In altre parole, possiamo affermare che, quando $z_L = z_c$, manca l'onda riflessa, il che è sinonimo di adattamento del carico.

In questa situazione, tutta l'onda (o l'energia) incidente viene trasmessa al carico come se esso fosse una linea infinita di impedenza z_c . Questa condizione si può anche esprimere dicendo che è unitario il cosiddetto **coefficiente di trasmissione sul carico**, definito dalla relazione

$$t = \frac{V_L}{V_i} = \frac{2z_L}{z_L + z_c}$$

E' possibile esprimere anche l'impedenza di ingresso, in corrispondenza della generica sezione z , in funzione del coefficiente di riflessione sul carico: intanto,

sappiamo che l'espressione generale per l'impedenza di ingresso si ricava dal sistema

$$\begin{cases} V(z) = V_i e^{\gamma z} + V_r e^{-\gamma z} \\ I(z) = \frac{V_i}{z_C} e^{\gamma z} - \frac{V_r}{z_C} e^{-\gamma z} \end{cases}$$

come rapporto tra tensione e corrente, per cui vale

$$z_i(z) = \frac{V_i e^{\gamma z} + V_r e^{-\gamma z}}{\frac{V_i}{z_C} e^{\gamma z} - \frac{V_r}{z_C} e^{-\gamma z}} = z_C \frac{V_i e^{\gamma z} + V_r e^{-\gamma z}}{V_i e^{\gamma z} - V_r e^{-\gamma z}}$$

Facciamo l'ipotesi che ci siano perdite nulle sulla linea: ciò significa che $\gamma = \alpha + j\beta = j\beta$, per cui si ottiene evidentemente che

$$z_i(z) = z_C \frac{V_i e^{j\beta z} + V_r e^{-j\beta z}}{V_i e^{j\beta z} - V_r e^{-j\beta z}} = z_C \frac{V_i + V_r e^{-j2\beta z}}{V_i - V_r e^{-j2\beta z}}$$

Dividendo ambo i membri per V_i e ricordando che $\rho_L = V_r/V_i$, concludiamo dunque che

$$z_i(z) = z_C \frac{1 + \rho_L e^{-j2\beta z}}{1 - \rho_L e^{-j2\beta z}}$$

Sempre in funzione del coefficiente di riflessione è possibile esprimere anche il rapporto d'onda stazionario ROS, ossia il rapporto tra il valore massimo e quello minimo assunti dal modulo della tensione (o dalla corrente). Intanto, tali valori massimo e minimo vanno ricavati dalla solita equazione

$$V(z) = V_i e^{\gamma z} + V_r e^{-\gamma z}$$

E' infatti evidente da qui che il massimo di tensione si ha quando l'onda incidente è in fase con quella riflessa, mentre il minimo si ha quando le due onde sono in opposizione di fase: quindi

$$\begin{aligned} |V|_{\text{MAX}} &= |V_i| + |V_r| \\ |V|_{\text{MIN}} &= |V_i| - |V_r| \end{aligned}$$

Applicando la definizione di ROS, abbiamo che

$$\text{ROS} = \frac{|V|_{\text{MAX}}}{|V|_{\text{MIN}}} = \frac{|V_i| + |V_r|}{|V_i| - |V_r|}$$

Dividendo ambo i membri per il modulo di V_i e ricordando sempre che $\rho_L = V_r/V_i$, si deduce subito che

$$\boxed{\text{ROS} = \frac{1 + |\rho_L|}{1 - |\rho_L|}}$$

Da quella relazione, con qualche semplice passaggio matematico, si ricava anche $|\rho_L|$ in funzione del ROS:

$$|\rho_L| = \frac{\text{ROS} - 1}{\text{ROS} + 1}$$

Ancora, è chiaro che, così come possiamo avere un valore massimo ed un valore minimo per $|V(z)|$, potremo avere anche un valore massimo ed uno minimo per l'impedenza di ingresso, la quale è definita come $V(z)/I(z)$. Vediamo allora quanto valgono questi valori.

L'impedenza di ingresso, in presenza di perdite, è definita come

$$z_i = z_c \frac{V_i e^{\gamma z} + V_r e^{-\gamma z}}{V_i e^{\gamma z} - V_r e^{-\gamma z}} = z_c \frac{e^{\gamma z} + \rho_L e^{-\gamma z}}{e^{\gamma z} - \rho_L e^{-\gamma z}} = z_c \frac{1 + \rho_L e^{-2\gamma z}}{1 - \rho_L e^{-2\gamma z}}$$

Il suo valore massimo si ha quando il numeratore assume il valore massimo e quando il denominatore assume il suo valore minimo: considerando che il termine esponenziale $e^{-2\gamma z}$ ha il valore 1 come valore massimo, deduciamo che risulterà

$$\boxed{z_{i,\text{MAX}} = z_c \frac{1 + |\rho_L|}{1 - |\rho_L|} = z_c * \text{ROS}}$$

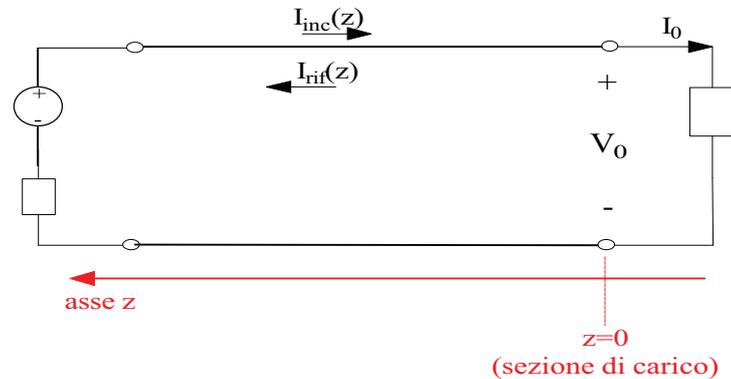
Evidentemente, il valore minimo dell'impedenza di ingresso si ricava con un discorso inverso (valore minimo del numeratore e valore massimo del denominatore), per cui

$$\boxed{z_{i,\text{MIN}} = z_c \frac{1 - |\rho_L|}{1 + |\rho_L|} = \frac{z_c}{\text{ROS}}}$$

Osservazione

Possiamo arrivare al concetto di *coefficiente di riflessione* seguendo una strada leggermente diversa (anche se equivalente) da quella seguita prima.

Supponiamo di avere una linea di trasmissione, di lunghezza L , alimentata da un generatore sinusoidale e chiusa su un carico generico z_L :



L'azione del generatore è quella di produrre un'onda (incidente) di tensione ed un'onda (incidente) di corrente che dal generatore stesso si propagano verso il carico: avendo preso l'asse z con origine ($z=0$) sul carico e diretta dal carico verso il generatore, abbiamo già visto che queste due onde incidenti avranno espressioni del tipo

$$\begin{cases} V_{inc}(z) = V_i e^{\gamma z} \\ I_{inc}(z) = \frac{V_i}{z_C} e^{\gamma z} = y_C V_i e^{\gamma z} \end{cases}$$

Dobbiamo capire cosa può succedere quando questa onda progressiva arriva sul carico.

In primo luogo, dire che la linea di trasmissione è chiusa sul carico z_L significa dire che vale la condizione al contorno $V(0) = z_L I(0)$ tra la tensione totale $V(0)$ e la corrente totale $I(0)$ in corrispondenza del carico stesso. Ci sono allora vari casi:

- il primo è quello in cui $z_L = z_C$ (*condizione di adattamento*), dove z_C è l'impedenza caratteristica della linea: in questa situazione, si osserva evidentemente che l'onda incidente prima riportata soddisfa, da sola, la condizione $V(0) = z_L I(0)$, per cui, a conferma di quanto detto precedentemente, non si ha la formazione di un'onda riflessa (o regressiva), ossia tutta la potenza fornita dal generatore viene completamente "assorbita" dal carico;
- il secondo caso (quello più realistico) è invece quello in cui $z_L \neq z_C$: questa volta, l'onda incidente non soddisfa la condizione $V(0) = z_L I(0)$, per cui deve necessariamente eccitarsi l'onda riflessa, che dovrà avere una intensità tale da soddisfare la suddetta condizione al contorno.

Ponendoci dunque in questo secondo caso, avremo un'onda riflessa la cui espressione sarà del tipo

$$\begin{cases} V_{\text{rif}}(z) = V_r e^{-\gamma z} \\ I_{\text{rif}}(z) = -\frac{V_r}{z_C} e^{-\gamma z} = -y_C V_r e^{-\gamma z} \end{cases}$$

La condizione al contorno sul carico è dunque

$$V_{\text{inc}}(0) + V_{\text{rif}}(0) = z_L (I_{\text{inc}}(0) + I_{\text{rif}}(0))$$

e, sostituendo le espressioni delle due onde, essa equivale a

$$V_i + V_r = z_L y_C (V_i - V_r)$$

A questo punto, dato che l'ampiezza dell'onda incidente è univocamente determinata dalle sorgenti che generano tale onda, possiamo ritenere noto il valore di V_i e possiamo perciò ricavarci, dall'ultima relazione, il valore di V_r :

$$V_r = \frac{z_L y_C - 1}{z_L y_C + 1} V_i$$

Detto questo, possiamo definire il *coefficiente di riflessione* (per la tensione e in corrispondenza del carico) come rapporto tra l'ampiezza dell'onda riflessa e l'ampiezza dell'onda incidente:

$$\rho_L = \frac{V_r}{V_i} = \frac{z_L y_C - 1}{z_L y_C + 1} = \frac{z_L - z_C}{z_L + z_C} = -\frac{y_L - y_C}{y_L + y_C}$$

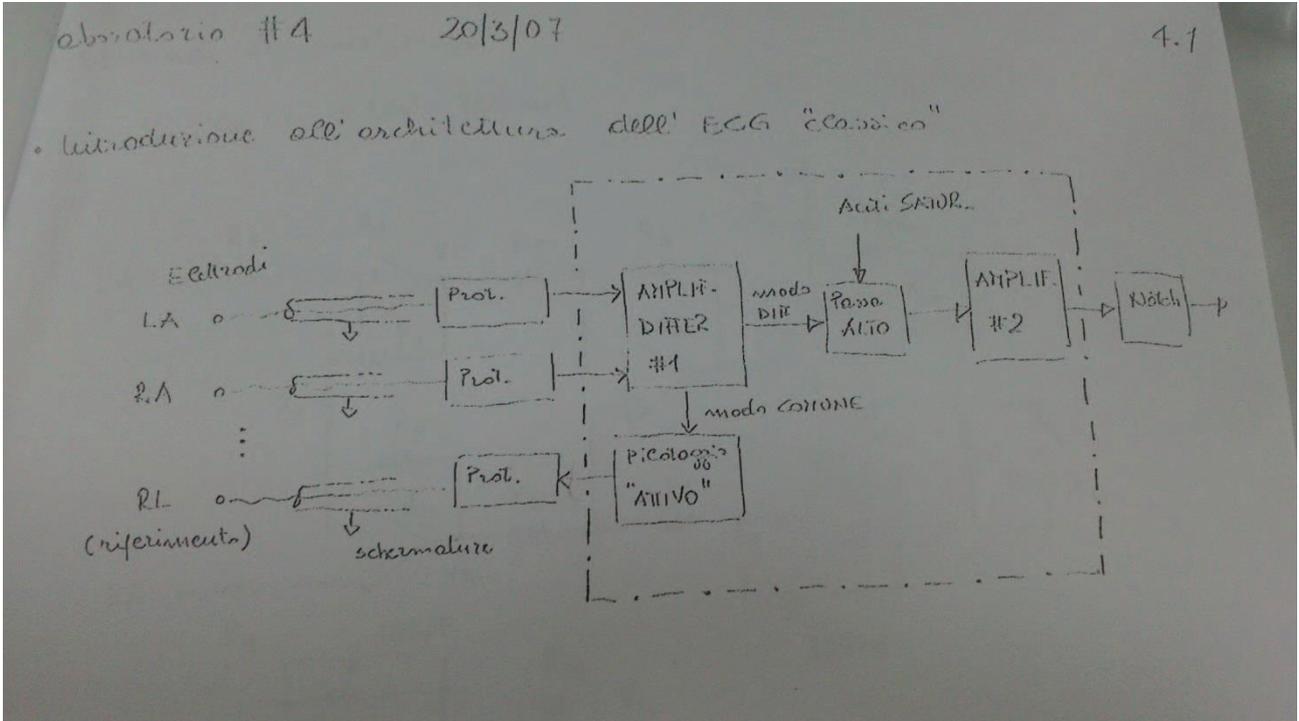
Si osserva immediatamente che ρ_L vale 0 quando $z_L = z_C$, come anticipato prima. E' inoltre facile verificare che il "*coefficiente di riflessione*" per la corrente (sempre in corrispondenza del carico) risulta essere

$$\rho'_L = \frac{I_r}{I_i} = -\rho_L$$

Autore: **Sandro Petrizzelli**
 e-mail: sandry@iol.it
 sito personale: <http://users.iol.it/sandry>

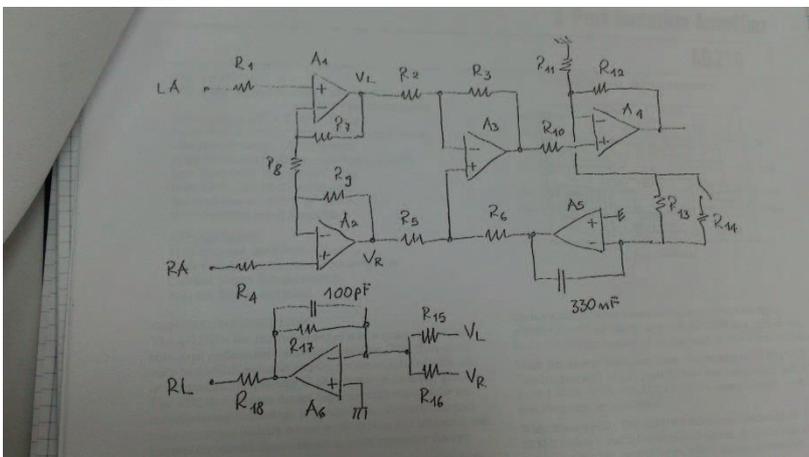
Elettrocardiografo (ECG)

Quello rappresentato è lo schema a blocchi di un elettrocardiografo.



Ovviamente l'idea non è quella di replicare fedelmente quell'oggetto, ma di vestire i panni del progettista e personalizzare questo sistema facendo opportune scelte sui componenti, sul come realizzarlo, ecc. . Allora avremo 3 ingressi che sono LA(left arm), RA(right arm) e RL(right leg) e sono le derivazioni classiche del segnale elettrocardiografico più facile da ottenere(di maggiore ampiezza). Il cavo che porta il segnale è un cavo coassiale, quindi all'ingresso della scheda occorre prevedere 2 connettori a 2 pin per un cavo schermato. Poi lo schermo dei cavi va al riferimento della sezione di segnale. In sistemi semplici la protezione è semplice, è una resistenza di valore elevato, che limita la corrente in caso di guasto del front-end (ad esempio dell'ordine dei 400K).

In questo blocco c'è tutto quello che va alla parte applicata, quindi c'è l'amplificatore differenziale, il pilotaggio attivo della gamba destra e il passa alto. Come viene ottenuto questo? Guardiamo il seguente schema realizzativo:



Il passa-alto in realtà non viene eseguito con un passa alto semplice, C-R come siamo abituati a pensare, ma in maniera più sofisticata si sfrutta la reazione. In che modo? Mettendo (anziché uno zero nell'origine) un polo nell'origine nella rete di reazione. Il circuito è reazionato da A5 che è un integratore.

L'interruttore che abilita il parallelo serve a cambiare la costante d'integrazione dell'integratore, ovvero la f_T del passa alto. Di solito un passa alto fa passare i mhZ , ma c'è un problema: se si stacca un elettrodo, gli operazionali A1 e A2 tendono a saturare poiché non giungono le correnti di polarizzazione. Se satura lo stadio d'ingresso, satura l'integratore e anche se metto a posto l'elettrodo, poi ci vogliono decine di secondi per ritornare a lavorare bene il sistema. Per accelerare questo processo (RECUPERO DELLA LINEA DI BASE) si riduce la costante RC del passa-alto.

Tutto questo è dentro una sezione che è alimentata con un suo GND e VCC e VEE.

Come si manda l'info a un visualizzatore, tipo oscilloscopio?

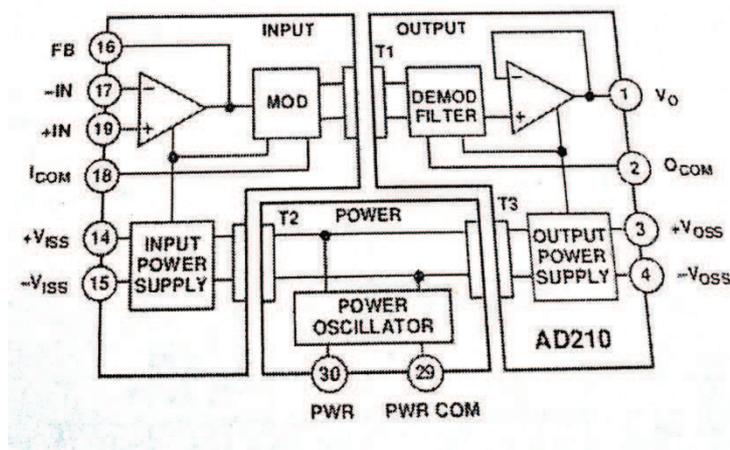
Quando c'è una parte applicata è importante garantire o un doppio isolamento, o un isolamento rinforzato. Quindi l'idea è quella di utilizzare un ISOLATION AMPLIFIER a 3 porte: l'AD210. È un unico circuito integrato abbastanza grande, il cui simbolo NON è in libreria!

Quest'oggetto è diviso sostanzialmente in 3 sezioni che sono isolate galvanicamente tra di loro, la tensione sopportata tra le diverse sezioni arriva a 3500V di picco.

Precision, Wide Bandwidth 3-Port Isolation Amplifier

AD210

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



Se sui pin 29 e 30 mandiamo un'alimentazione, questo chip svolge due funzionalità:

- 1) Genera sia a dx che sx delle alimentazioni a +15 e -15 che alimentano la sezione d'ingresso e quella d'uscita
- 2) Il segnale d'ingresso viene riportato in uscita senza avere connessione elettrica

OSS. Le alimentazioni in gioco sono 3: due escono dall'AD210 verso le sezioni di IN/OUT e una alimenta l'AD210, ci sarà un alimentatore da 15V (il 7815).

Infine nell'ultima sezione c'è il NOTCH: è un filtro che ha un diagramma di modulo con 2 poli complessi coniugati e 2 zeri reali. Presenta un buco che va collocato a 50 Hz (freq. di rete) per eliminare il disturbo che arriva a causa della rete. Poi il segnale lo si può leggere con un oscilloscopio.

Quest'oggetto è abbastanza sicuro, poiché la parte applicata ha un doppio isolamento: uno nell'AD210 e uno nel trasformatore dell'alimentatore 7815.

L'esercitazione prevede di fare i quattro schemi:

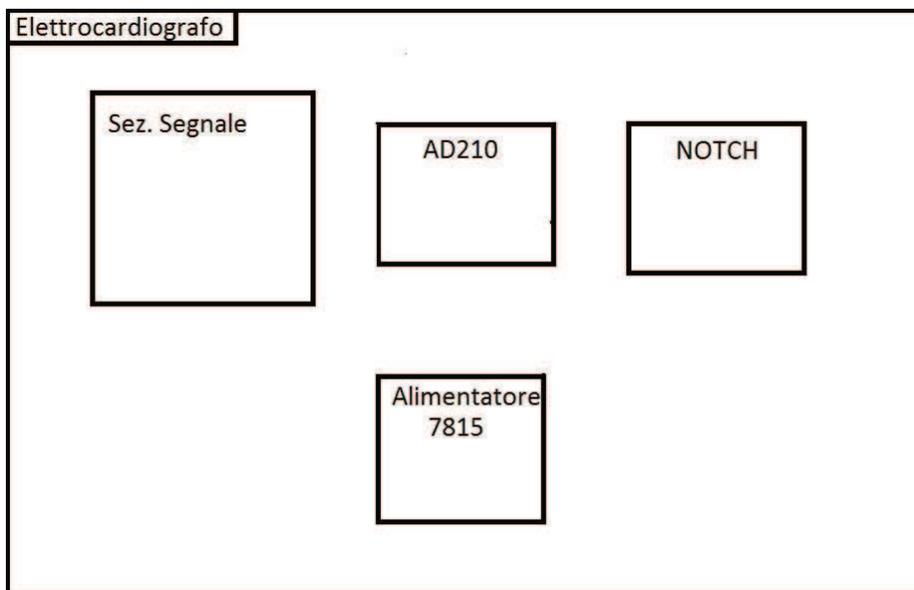
-sezione del segnale

-AD210

-Alimentatore 7815

-NOTCH

E poi un quinto schema che li racchiude tutti e 4.



COSTRUZIONI ELETTRONICHE		Data: 08 Settembre 2011
Cognome _____	Test	Valutazione
Nome _____	Posizione:	
Tempo disponibile: 20' Valutazione:..... Solo una risposta è corretta. Risposta esatta: 1; nessuna risposta: 0; risposta errata: -0.33. Non si possono consultare testi o appunti		

Quanto vale l'affidabilità di un sistema, funzionalmente costituito da 3 sottosistemi uguali indipendenti in parallelo di affidabilità 0,5?

- 0,25
- 0,125
- 0,75
- 0,875

Quale è l'affidabilità per il tempo di missione di 30 anni di un sistema che presenta tasso di guasto costante e pari a 3 guasti il secolo?

- 7%
- 41%
- 67%
- 13%

Quali sono le principali proprietà del pin di un simbolo di un componente in uno schema elettrico?

- Qualità, costo, tempo di ritardo, frequenza massima
- Forma, tipo, nome, numero
- Colore, spessore, lunghezza
- Resistenza, induttanza, capacità parassita

Per quale scopo si definisce la "forma" di un pin in un simbolo usato per indicare un componente in uno schema elettrico?

- Tramite la forma si indica al simulatore logico se un pin agisce con logica affermata o negata
- La forma grafica serve solo ai fini di una documentazione chiara e completa
- La forma del pin permette di associare una larghezza predefinita alle piste collegate nel PCB
- Tramite la forma si indica al programma di verifica se il pin è di ingresso, di uscita o bidirezionale

Quale spiegazione può darsi al fatto che, durante il progetto, in uno schema elettrico diversi simboli hanno tutti lo stesso valore?

- Il CAD impedisce in generale di usare per due simboli diversi lo stesso valore
- Tutti i simboli con lo stesso valore indicano il medesimo componente, e il CAD collega automaticamente tra loro i nodi relativi ai pin corrispondenti
- Si tratta di componenti distinti, ma di valore uguali tra loro
- Si tratta di una fase del progetto preliminare, precedente l'annotazione

In uno schema elettrico diversi simboli sono individuati dallo stesso numero di riferimento, a cui è aggiunta una differente lettera. Perché?

- Si tratta di parti diverse di un solo componente multiparte
- Si tratta di varianti dello stesso componente con tempi di ritardo diversi
- Si tratta di simboli che indicano componenti da montare in alternativa
- Non sono mai ammesse lettere oltre quelle iniziali (R per le resistenze, C per i condensatori, U

per gli integrati, ecc.) nella specificazione di un riferimento

Nel disegno dei layer “solder resist” occorre prestare attenzione a ...

Alle piste sottostanti

Al colore degli elementi grafici usati

Il layer è generato in modo automatico, quindi occorre controllare la configurazione del CAD

Evitare di scrivere testo o grafica in corrispondenza dei pad per la saldatura dei componenti

Per quale motivo alla fine del progetto geometrico è bene eseguire una verifica complessiva delle regole di progetto, anche se durante il disegno si è usata la verifica “on line”?

Perché comunemente la verifica on line è limitata a una parte dell'area di progetto ed esegue verifiche parziali per non rallentare il disegno

Non è vero: la verifica in linea dà sufficienti garanzie

Perché la verifica in linea si limita a verificare le regole relative a un singolo layer

La verifica finale tiene conto anche dei risultati della simulazione elettrica

In cosa consiste una “giunzione” nello schema elettrico?

Una crocetta posta in corrispondenza di alcuni pin

Un simbolo grafico che indica la presenza di una via nel corrispondente PCB

Un semplice pallino che indica la presenza di connessione tra fili in contatto

Un simbolo grafico che indica la necessità di eseguire una saldatura nel PCB corrispondente

Che cos'è uno scarico termico nel progetto di un PCB?

Una geometria predisposta su un layer conduttore per facilitare la dissipazione di calore del componente ad essa saldato

Una connessione tra pad e piano conduttore a elevata resistenza termica

Una connessione tra pad e piano conduttore a elevata conduttanza termica

Lo scarto durante la produzione dovuto alle elevate temperature

Che cos'è l'annotazione incrementale di uno schema elettrico?

L'apposizione di commenti essenziali nello schema elettrico

L'attribuzione di un numero progressivo all'etichetta di riferimento di ciascun componente che non sia ancora stato precisato dal progettista

L'attribuzione di un numero progressivo all'etichetta di riferimento di ciascun componente presente nello schema

L'attribuzione di un numero progressivo all'etichetta di valore di ciascun componente che non sia ancora stata precisato dal progettista

Come vengono passate in un CAD le informazioni dallo schema elettrico al disegno del PCB?

Tramite uno strumento grafico detto “ratsnet”

Tramite un file di netlist, il cui formato è definito da appositi standard

Manualmente, dal progettista

Tramite il file che descrive lo schema, costituito essenzialmente da una mappa di bit

Perché il “dead time” ha diretta influenza sulla THD di un amplificatore in classe D?

Perché la corrente nel carico viene interrotta dall'apertura di entrambi i MOS

Perché un tempo morto troppo breve provoca picchi di corrente elevati in ciascun ramo del ponte

Perché durante il tempo morto il circuito di uscita è più sensibile ai disturbi

Perché il tempo morto si somma in modo differente al tempo di conduzione del lato alto o basso del ramo del ponte pilotato, dipendentemente dal verso della corrente di uscita

Perché il fenomeno del “power supply pumping” è significativo solo negli amplificatori in classe D half bridge?

Negli amplificatori half bridge, a differenza di quelli full bridge, si ha una tensione di uscita la cui ampiezza vale al massimo la metà della tensione presente tra i due binari di alimentazione
Negli amplificatori full bridge la corrente che durante una semionda tende ad aumentare in modulo il valore di uno dei binari di alimentazione è compensata dalla corrente di segno opposto che scorre nell'altro ramo del ponte
Perché negli amplificatori half bridge occorre usare nel filtro di uscita un induttore di valore doppio rispetto a quello degli amplificati full bridge
Non è vero: il pumping è ugualmente significativo anche degli amplificatori full bridge

Che cosa fa un filtro in una tabella di selezione parametrica?

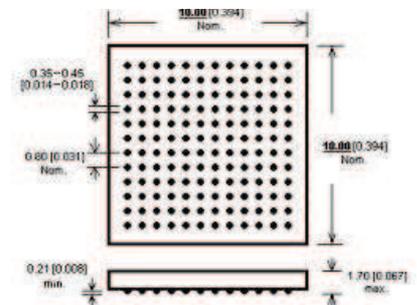
Permette di selezionare solo i componenti della tabella che rispettano certe caratteristiche, indicate generalmente tramite semplici operatori logici
Garantisce la pulizia delle schede dai residui della saldatura
Elimina le frequenze indesiderate secondo parametri impostabili
Fa passare i parametri il cui valore è inferiore a una soglia impostabile

Quale grandezza fisica ha il principale impatto sulla massima potenza media supportabile da un resistore?

La capacità termica del conduttore
La conducibilità elettrica del conduttore
La rigidità dielettrica dell'isolante circostante
La superficie e la forma del conduttore

Con quale sigla viene indicato il package in figura?

- QFP144
- BGA144
- SOIC144
- DIP144



Quale è il principale aspetto positivo dei resistori a filo?

Sono poco costosi
Sono molto precisi
Presentano bassa induttanza parassita
Sono facilmente realizzabili con tecnologie planari

Che relazione esiste tra capacità, tensione massima di lavoro e volume per un condensatore di data tecnologia?

Il volume è proporzionale al prodotto tra capacità e tensione di lavoro.
Il volume è proporzionale alla capacità e al quadrato della tensione di lavoro.
Il volume è proporzionale alla capacità e inversamente proporzionale alla tensione di lavoro.
Il volume è proporzionale alla capacità e indipendente dalla tensione di lavoro.

Per un condensatore reale, quale grandezza viene modellata da una resistenza in serie alla capacità?

Gli effetti ad alte frequenze (skin effect)
L'induttanza parassita dei reofori collegati alle armature
Le perdite nel dielettrico per polarizzazione e dovute alla resistenza dei conduttori

La corrente di perdita

Per quali aspetti gli induttori in aria sono peggiori di quelli avvolti su nucleo ferromagnetico?

- È più difficile realizzare induttori lineari
- Provocano più disturbi nei circuiti circostanti
- Risentono maggiormente dei campi magnetici esterni
- Sono più difficili da realizzare

Quale processo tecnologico è indispensabile per la realizzazione di PCB multilayer e non per un processo singola faccia per componenti through hole?

- Deposizione del solder resist
- Metallizzazione dei fori
- Scontornatura
- Foratura

Che differenza c'è tra via sepolta e via cieca?

- La via cieca permette di connettere strati non adiacenti
- La via sepolta riguarda strati interni, quella cieca unisce uno strato estremo con uno o più strati adiacenti
- Nessuna, sono diverse definizioni della stessa cosa
- La via cieca, a differenza di quella sepolta, prevede un processo di planarizzazione per evitare deformazioni degli strati adiacenti

Quali informazioni deve fornire solitamente il progettisti all'azienda che realizza il PCB?

- Le regole per garantire l'integrità dei segnali e per il corretto progetto termico
- I datasheet dei componenti elettronici usati e lo schema elettrico
- I file per le maschere prodotti dal CAD e quelli per la foratura
- La stampa a colori di tutti i layer del PCB

Che cosa è la "ratnest"?

- Il contorno della scheda
- Una rappresentazione grafica delle connessioni tra i pin dei moduli che tiene conto della impenetrabilità dei package dei dispositivi
- Una rappresentazione grafica senza dimensioni né vincoli delle connessioni tra i pin dei moduli
- Un algoritmo per il piazzamento automatico dei footprint nel progetto geometrico del PCB

Cos'è un guasto permanente?

- È un guasto sistematico dovuto a un errore di progetto
- È un guasto la cui presenza si alterna a periodi di corretto funzionamento
- È un guasto il cui effetto permane indefinitamente dopo l'insorgenza
- È un guasto per cui una linea logica assume permanentemente lo stesso valore

Come viene definito il tratto centrale della curva a vasca da bagno?

- Fase di burn in
- Mortalità infantile
- Fase normale operativa
- Vecchiaia

Quale meccanismo sfruttano le prove accelerate di affidabilità?

L'attribuzione di parametri di frequenza, gravità e rivelabilità a ogni tipologia di guasto
L'analisi dettagliata dei guasti rilevati durante il normale funzionamento di un componente
La valutazione teorica delle relazioni funzionali tra elementi di un componente e della relativa affidabilità eseguita rapidamente tramite computer
L'esposizione di lotti di componenti a condizioni ambientali e di temperatura limite e la presenza di modelli matematici di accelerazione

Quale è il massimo rendimento di un amplificatore in classe B?

- 50%
- 78.5%
- 25%
- 87.5%

Quale potenza deve essere in grado di dissipare ciascuno dei due transistori di un amplificatore di potenza in classe B da 100W?

- 100 W
- 50 W
- 20 W
- 10 W

Quanto vale l'impedenza caratteristica di una pista di cui si conosce capacità (8 pF) e induttanza (20 nH) verso il piano sottostante di un tratto pari a 10 cm?

- 100 Ω
- 500 Ω
- 1000 Ω
- 2500 Ω

COSTRUZIONI ELETTRONICHE		Data: 28 Novembre 2011
Cognome _____	Test	Valutazione
Nome _____	Posizione:	
Tempo disponibile: 20' Valutazione:..... Solo una risposta è corretta. Risposta esatta: 1; nessuna risposta: 0; risposta errata: -0.33. Non si possono consultare testi o appunti		

Quanto vale l'affidabilità di un sistema, funzionalmente costituito da 3 sottosistemi uguali indipendenti in parallelo di affidabilità 0,5?

- 0,25
- 0,125
- 0,75
- 0,875

Quale è l'affidabilità per il tempo di missione di 30 anni di un sistema che presenta tasso di guasto costante e pari a 3 guasti il secolo?

- 7%
- 41%
- 67%
- 13%

Quali sono le principali proprietà del pin di un simbolo di un componente in uno schema elettrico?

- Qualità, costo, tempo di ritardo, frequenza massima
- Forma, tipo, nome, numero
- Colore, spessore, lunghezza
- Resistenza, induttanza, capacità parassita

Per quale scopo si definisce la "forma" di un pin in un simbolo usato per indicare un componente in uno schema elettrico?

- Tramite la forma si indica al simulatore logico se un pin agisce con logica affermata o negata
- La forma grafica serve solo ai fini di una documentazione chiara e completa
- La forma del pin permette di associare una larghezza predefinita alle piste collegate nel PCB
- Tramite la forma si indica al programma di verifica se il pin è di ingresso, di uscita o bidirezionale

Quale spiegazione può darsi al fatto che, durante il progetto, in uno schema elettrico diversi simboli hanno tutti lo stesso valore?

- Il CAD impedisce in generale di usare per due simboli diversi lo stesso valore
- Tutti i simboli con lo stesso valore indicano il medesimo componente, e il CAD collega automaticamente tra loro i nodi relativi ai pin corrispondenti
- Si tratta di componenti distinti, ma di valore uguali tra loro
- Si tratta di una fase del progetto preliminare, precedente l'annotazione

In uno schema elettrico diversi simboli sono individuati dallo stesso numero di riferimento, a cui è aggiunta una differente lettera. Perché?

- Si tratta di parti diverse di un solo componente multiparte
- Si tratta di varianti dello stesso componente con tempi di ritardo diversi
- Si tratta di simboli che indicano componenti da montare in alternativa
- Non sono mai ammesse lettere oltre quelle iniziali (R per le resistenze, C per i condensatori, U

per gli integrati, ecc.) nella specificazione di un riferimento

Nel disegno dei layer “solder resist” occorre prestare attenzione a ...

Alle piste sottostanti

Al colore degli elementi grafici usati

Il layer è generato in modo automatico, quindi occorre controllare la configurazione del CAD

Evitare di scrivere testo o grafica in corrispondenza dei pad per la saldatura dei componenti

Per quale motivo alla fine del progetto geometrico è bene eseguire una verifica complessiva delle regole di progetto, anche se durante il disegno si è usata la verifica “on line”?

Perché comunemente la verifica on line è limitata a una parte dell'area di progetto ed esegue verifiche parziali per non rallentare il disegno

Non è vero: la verifica in linea dà sufficienti garanzie

Perché la verifica in linea si limita a verificare le regole relative a un singolo layer

La verifica finale tiene conto anche dei risultati della simulazione elettrica

In cosa consiste una “giunzione” nello schema elettrico?

Una crocetta posta in corrispondenza di alcuni pin

Un simbolo grafico che indica la presenza di una via nel corrispondente PCB

Un semplice pallino che indica la presenza di connessione tra fili in contatto

Un simbolo grafico che indica la necessità di eseguire una saldatura nel PCB corrispondente

Che cos'è uno scarico termico nel progetto di un PCB?

Una geometria predisposta su un layer conduttore per facilitare la dissipazione di calore del componente ad essa saldato

Una connessione tra pad e piano conduttore a elevata resistenza termica

Una connessione tra pad e piano conduttore a elevata conduttanza termica

Lo scarto durante la produzione dovuto alle elevate temperature

Che cos'è l'annotazione incrementale di uno schema elettrico?

L'apposizione di commenti essenziali nello schema elettrico

L'attribuzione di un numero progressivo all'etichetta di riferimento di ciascun componente che non sia ancora stato precisato dal progettista

L'attribuzione di un numero progressivo all'etichetta di riferimento di ciascun componente presente nello schema

L'attribuzione di un numero progressivo all'etichetta di valore di ciascun componente che non sia ancora stata precisato dal progettista

Come vengono passate in un CAD le informazioni dallo schema elettrico al disegno del PCB?

Tramite uno strumento grafico detto “ratsnet”

Tramite un file di netlist, il cui formato è definito da appositi standard

Manualmente, dal progettista

Tramite il file che descrive lo schema, costituito essenzialmente da una mappa di bit

Perché il “dead time” ha diretta influenza sulla THD di un amplificatore in classe D?

Perché la corrente nel carico viene interrotta dall'apertura di entrambi i MOS

Perché un tempo morto troppo breve provoca picchi di corrente elevati in ciascun ramo del ponte

Perché durante il tempo morto il circuito di uscita è più sensibile ai disturbi

Perché il tempo morto si somma in modo differente al tempo di conduzione del lato alto o basso del ramo del ponte pilotato, dipendentemente dal verso della corrente di uscita

Perché il fenomeno del “power supply pumping” è significativo solo negli amplificatori in classe D half bridge?

Negli amplificatori half bridge, a differenza di quelli full bridge, si ha una tensione di uscita la cui ampiezza vale al massimo la metà della tensione presente tra i due binari di alimentazione. Negli amplificatori full bridge la corrente che durante una semionda tende ad aumentare in modulo il valore di uno dei binari di alimentazione è compensata dalla corrente di segno opposto che scorre nell'altro ramo del ponte.

Perché negli amplificatori half bridge occorre usare nel filtro di uscita un induttore di valore doppio rispetto a quello degli amplificati full bridge?

Non è vero: il pumping è ugualmente significativo anche degli amplificatori full bridge.

Che cosa fa un filtro in una tabella di selezione parametrica?

Permette di selezionare solo i componenti della tabella che rispettano certe caratteristiche, indicate generalmente tramite semplici operatori logici.

Garantisce la pulizia delle schede dai residui della saldatura.

Elimina le frequenze indesiderate secondo parametri impostabili.

Fa passare i parametri il cui valore è inferiore a una soglia impostabile.

Quale grandezza fisica ha il principale impatto sulla massima potenza media sopportabile da un resistore?

La capacità termica del conduttore.

La conducibilità elettrica del conduttore.

La rigidità dielettrica dell'isolante circostante.

La superficie e la forma del conduttore.

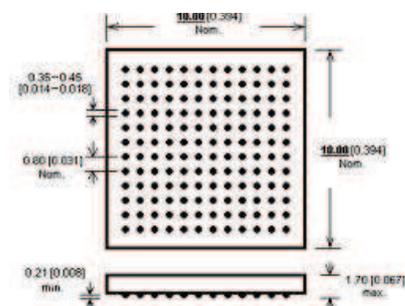
Con quale sigla viene indicato il package in figura?

QFP144

BGA144

SOIC144

DIP144



Quale è il principale aspetto positivo dei resistori a filo?

Sono poco costosi.

Sono molto precisi.

Presentano bassa induttanza parassita.

Sono facilmente realizzabili con tecnologie planari.

Che relazione esiste tra capacità, tensione massima di lavoro e volume per un condensatore di data tecnologia?

Il volume è proporzionale al prodotto tra capacità e tensione di lavoro.

Il volume è proporzionale alla capacità e al quadrato della tensione di lavoro.

Il volume è proporzionale alla capacità e inversamente proporzionale alla tensione di lavoro.

Il volume è proporzionale alla capacità e indipendente dalla tensione di lavoro.

Per un condensatore reale, quale grandezza viene modellata da una resistenza in serie alla capacità?

Gli effetti ad alte frequenze (skin effect).

L'induttanza parassita dei reofori collegati alle armature.

Le perdite nel dielettrico per polarizzazione e dovute alla resistenza dei conduttori.

La corrente di perdita

Per quali aspetti gli induttori in aria sono peggiori di quelli avvolti su nucleo ferromagnetico?

- È più difficile realizzare induttori lineari
- Provocano più disturbi nei circuiti circostanti
- Risentono maggiormente dei campi magnetici esterni
- Sono più difficili da realizzare

Quale processo tecnologico è indispensabile per la realizzazione di PCB multilayer e non per un processo singola faccia per componenti through hole?

- Deposizione del solder resist
- Metallizzazione dei fori
- Scontornatura
- Foratura

Che differenza c'è tra via sepolta e via cieca?

- La via cieca permette di connettere strati non adiacenti
- La via sepolta riguarda strati interni, quella cieca unisce uno strato estremo con uno o più strati adiacenti
- Nessuna, sono diverse definizioni della stessa cosa
- La via cieca, a differenza di quella sepolta, prevede un processo di planarizzazione per evitare deformazioni degli strati adiacenti

Quali informazioni deve fornire solitamente il progettisti all'azienda che realizza il PCB?

- Le regole per garantire l'integrità dei segnali e per il corretto progetto termico
- I datasheet dei componenti elettronici usati e lo schema elettrico
- I file per le maschere prodotti dal CAD e quelli per la foratura
- La stampa a colori di tutti i layer del PCB

Che cosa è la "ratnest"?

- Il contorno della scheda
- Una rappresentazione grafica delle connessioni tra i pin dei moduli che tiene conto della impenetrabilità dei package dei dispositivi
- Una rappresentazione grafica senza dimensioni né vincoli delle connessioni tra i pin dei moduli
- Un algoritmo per il piazzamento automatico dei footprint nel progetto geometrico del PCB

Cos'è un guasto permanente?

- È un guasto sistematico dovuto a un errore di progetto
- È un guasto la cui presenza si alterna a periodi di corretto funzionamento
- È un guasto il cui effetto permane indefinitamente dopo l'insorgenza
- È un guasto per cui una linea logica assume permanentemente lo stesso valore

Come viene definito il tratto centrale della curva a vasca da bagno?

- Fase di burn in
- Mortalità infantile
- Fase normale operativa
- Vecchiaia

Quale meccanismo sfruttano le prove accelerate di affidabilità?

L'attribuzione di parametri di frequenza, gravità e rivelabilità a ogni tipologia di guasto
L'analisi dettagliata dei guasti rilevati durante il normale funzionamento di un componente
La valutazione teorica delle relazioni funzionali tra elementi di un componente e della relativa affidabilità eseguita rapidamente tramite computer
L'esposizione di lotti di componenti a condizioni ambientali e di temperatura limite e la presenza di modelli matematici di accelerazione

Quale è il massimo rendimento di un amplificatore in classe B?

- 50%
- 78.5%
- 25%
- 87.5%

Quale potenza deve essere in grado di dissipare ciascuno dei due transistori di un amplificatore di potenza in classe B da 100W?

- 100 W
- 50 W
- 20 W
- 10 W

Quanto vale l'impedenza caratteristica di una pista di cui si conosce capacità (8 pF) e induttanza (20 nH) verso il piano sottostante di un tratto pari a 10 cm?

- 100 Ω
- 500 Ω
- 1000 Ω
- 2500 Ω

COSTRUZIONI ELETTRONICHE		Data: 12 Dicembre 2011
Cognome _____	Test	Valutazione
Nome _____	Posizione:	
Tempo disponibile: 20' Valutazione:..... Solo una risposta è corretta. Risposta esatta: 1; nessuna risposta: 0; risposta errata: -0.33. Non si possono consultare testi o appunti		

In cosa consiste una “giunzione” nello schema elettrico?

- Un simbolo grafico che indica la presenza di una via nel corrispondente PCB
- Un semplice pallino che indica la presenza di connessione tra fili in contatto
- Un simbolo grafico che indica la necessità di eseguire una saldatura nel PCB corrispondente
- Una crocetta posta in corrispondenza di alcuni pin

Che cos'è uno scarico termico nel progetto di un PCB?

- Una geometria predisposta su un layer conduttore per facilitare la dissipazione di calore del componente ad essa saldato
- Una connessione tra pad e piano conduttore a elevata conduttanza termica
- Lo scarto durante la produzione dovuto alle elevate temperature
- Una connessione tra pad e piano conduttore a elevata resistenza termica

Che cos'è l'annotazione incrementale di uno schema elettrico?

- L'apposizione di commenti essenziali nello schema elettrico
- L'attribuzione di un numero progressivo all'etichetta di riferimento di ciascun componente presente nello schema
- L'attribuzione di un numero progressivo all'etichetta di riferimento di ciascun componente che non sia ancora stato precisato dal progettista
- L'attribuzione di un numero progressivo all'etichetta di valore di ciascun componente che non sia ancora stata precisato dal progettista

Come vengono passate in un CAD le informazioni dallo schema elettrico al disegno del PCB?

- Tramite un file di netlist, il cui formato è definito da appositi standard
- Manualmente, dal progettista
- Tramite uno strumento grafico detto “ratsnet”
- Tramite il file che descrive lo schema, costituito essenzialmente da una mappa di bit

Perché il “dead time” ha diretta influenza sulla THD di un amplificatore in classe D?

- Perché la corrente nel carico viene interrotta dall'apertura di entrambi i MOS
- Perché durante il tempo morto il circuito di uscita è più sensibile ai disturbi
- Perché il tempo morto si somma in modo differente al tempo di conduzione del lato alto o basso del ramo del ponte pilotato, dipendentemente dal verso della corrente di uscita
- Perché un tempo morto troppo breve provoca picchi di corrente elevati in ciascun ramo del ponte

Quanto vale l'affidabilità di un sistema, funzionalmente costituito da 3 sottosistemi uguali indipendenti in parallelo di affidabilità 0,5?

- 0,25
- 0,125
- 0,75
- 0,875

Quale è l'affidabilità per il tempo di missione di 30 anni di un sistema che presenta tasso di guasto costante e pari a 3 guasti il secolo?

- 7%
- 41%
- 67%
- 13%

Quali sono le principali proprietà del pin di un simbolo di un componente in uno schema elettrico?

- Forma, tipo, nome, numero
- Colore, spessore, lunghezza
- Qualità, costo, tempo di ritardo, frequenza massima
- Resistenza, induttanza, capacità parassita

Per quale scopo si definisce la “forma” di un pin in un simbolo usato per indicare un componente in uno schema elettrico?

- Tramite la forma si indica al simulatore logico se un pin agisce con logica affermata o negata
- La forma grafica serve solo ai fini di una documentazione chiara e completa
- Tramite la forma si indica al programma di verifica se il pin è di ingresso, di uscita o bidirezionale
- La forma del pin permette di associare una larghezza predefinita alle piste collegate nel PCB

Quale spiegazione può darsi al fatto che, durante il progetto, in uno schema elettrico diversi simboli hanno tutti lo stesso valore?

- Il CAD impedisce in generale di usare per due simboli diversi lo stesso valore
- Tutti i simboli con lo stesso valore indicano il medesimo componente, e il CAD collega automaticamente tra loro i nodi relativi ai pin corrispondenti
- Si tratta di componenti distinti, ma di valore uguali tra loro
- Si tratta di una fase del progetto preliminare, precedente l'annotazione

In uno schema elettrico diversi simboli sono individuati dallo stesso numero di riferimento, a cui è aggiunta una differente lettera. Perché?

- Si tratta di varianti dello stesso componente con tempi di ritardo diversi
- Si tratta di parti diverse di un solo componente multiparte
- Si tratta di simboli che indicano componenti da montare in alternativa
- Non sono mai ammesse lettere oltre quelle iniziali (R per le resistenze, C per i condensatori, U per gli integrati, ecc.) nella specificazione di un riferimento

Nel disegno dei layer “solder resist” occorre prestare attenzione a ...

- Alle piste sottostanti
- Il layer è generato in modo automatico, quindi occorre controllare la configurazione del CAD
- Al colore degli elementi grafici usati
- Evitare di scrivere testo o grafica in corrispondenza dei pad per la saldatura dei componenti

Per quale motivo alla fine del progetto geometrico è bene eseguire una verifica complessiva delle regole di progetto, anche se durante il disegno si è usata la verifica “on line”?

- Perché comunemente la verifica on line è limitata a una parte dell'area di progetto ed esegue verifiche parziali per non rallentare il disegno
- Non è vero: la verifica in linea dà sufficienti garanzie
- Perché la verifica in linea si limita a verificare le regole relative a un singolo layer
- La verifica finale tiene conto anche dei risultati della simulazione elettrica

Perché il fenomeno del “power supply pumping” è significativo solo negli amplificatori in classe D half bridge?

Negli amplificatori full bridge la corrente che durante una semionda tende ad aumentare in modulo il valore di uno dei binari di alimentazione è compensata dalla corrente di segno opposto che scorre nell'altro ramo del ponte

Negli amplificatori half bridge, a differenza di quelli full bridge, si ha una tensione di uscita la cui ampiezza vale al massimo la metà della tensione presente tra i due binari di alimentazione

Perché negli amplificatori half bridge occorre usare nel filtro di uscita un induttore di valore doppio rispetto a quello degli amplificati full bridge

Non è vero: il pumping è ugualmente significativo anche degli amplificatori full bridge

Quanto vale l'impedenza caratteristica di una pista di cui si conosce capacità (8 pF) e induttanza (20 nH) verso il piano sottostante di un tratto pari a 10 cm?

100 Ω

50 Ω

1000 Ω

2500 Ω

Che cosa fa un filtro in una tabella di selezione parametrica?

Permette di selezionare solo i componenti della tabella che rispettano certe caratteristiche, indicate generalmente tramite semplici operatori logici

Garantisce la pulizia delle schede dai residui della saldatura

Elimina le frequenze indesiderate secondo parametri impostabili

Fa passare i parametri il cui valore è inferiore a una soglia impostabile

Quale grandezza fisica ha il principale impatto sulla massima potenza media sopportabile da un resistore?

La capacità termica del conduttore

La conducibilità elettrica del conduttore

La rigidità dielettrica dell'isolante circostante

La superficie e la forma del conduttore

Con quale sigla viene indicato il package in figura?

QFP28

BGA28

SOIC28

DIP28



Quale è il principale aspetto positivo dei resistori a film sottile?

Sono poco costosi

Sono molto precisi

Presentano bassa capacità parassita

Sopportano forti sovraccarichi di potenza

Quale potenza deve essere in grado di dissipare ciascuno dei due transistori di un amplificatore di potenza in classe B da 100W?

100 W

50 W

20 W

Per quali aspetti gli induttori in ferrite sono peggiori di quelli avvolti su nucleo ferromagnetico?

- È più difficile realizzare induttori di grande valore
- Provocano più disturbi nei circuiti circostanti
- Risentono maggiormente dei campi magnetici esterni
- Sono più difficili da realizzare

Quale processo tecnologico è indispensabile per la realizzazione di PCB multilayer e non per un processo singola faccia per componenti through hole?

- Deposizione del solder resist
- Metallizzazione dei fori
- Scontornatura
- Foratura

Che differenza c'è tra via sepolta e via cieca?

- La via cieca permette di connettere strati non adiacenti
- La via sepolta riguarda strati interni, quella cieca unisce uno strato estremo con uno o più strati adiacenti
- Nessuna, sono diverse definizioni della stessa cosa
- La via cieca, a differenza di quella sepolta, prevede un processo di planarizzazione per evitare deformazioni degli strati adiacenti

Quali informazioni deve fornire solitamente il progettista all'azienda che realizza il PCB?

- Le regole per garantire l'integrità dei segnali e per il corretto progetto termico
- I datasheet dei componenti elettronici usati e lo schema elettrico
- I file per le maschere prodotti dal CAD e quelli per la foratura
- La stampa a colori di tutti i layer del PCB

Che cosa è la "ratnest"?

- Il contorno della scheda
- Una rappresentazione grafica delle connessioni tra i pin dei moduli che tiene conto della impenetrabilità dei package dei dispositivi
- Una rappresentazione grafica senza dimensioni né vincoli delle connessioni tra i pin dei moduli
- Un algoritmo per il piazzamento automatico dei footprint nel progetto geometrico del PCB

Cos'è un guasto permanente?

- È un guasto sistematico dovuto a un errore di progetto
- È un guasto la cui presenza si alterna a periodi di corretto funzionamento
- È un guasto il cui effetto permane indefinitamente dopo l'insorgenza
- È un guasto per cui una linea logica assume permanentemente lo stesso valore

Come viene definito il tratto centrale della curva a vasca da bagno?

- Fase normale operativa
- Fase di burn in
- Mortalità infantile
- Vecchiaia

Quale meccanismo sfruttano le prove accelerate di affidabilità?

- L'attribuzione di parametri di frequenza, gravità e rivelabilità a ogni tipologia di guasto
- La valutazione teorica delle relazioni funzionali tra elementi di un componente e della relativa affidabilità eseguita rapidamente tramite computer
- L'analisi dettagliata dei guasti rilevati durante il normale funzionamento di un componente
- L'esposizione di lotti di componenti a condizioni ambientali e di temperatura limite e la presenza di modelli matematici di accelerazione

Che relazione esiste tra capacità, tensione massima di lavoro e volume per un condensatore di data tecnologia?

- Il volume è proporzionale alla capacità e inversamente proporzionale alla tensione di lavoro.
- Il volume è proporzionale al prodotto tra capacità e tensione di lavoro.
- Il volume è proporzionale alla capacità e al quadrato della tensione di lavoro.
- Il volume è proporzionale alla capacità e indipendente dalla tensione di lavoro.

Per un condensatore reale, quale grandezza viene modellata da una resistenza in serie alla capacità?

- Gli effetti ad alte frequenze (skin effect)
- Le perdite nel dielettrico per polarizzazione e dovute alla resistenza dei conduttori
- L'induttanza parassita dei reofori collegati alle armature
- La corrente di perdita

Quale è il massimo rendimento di un amplificatore in classe B?

- 68.5%
- 78.5%
- 25%
- 87.5%

COSTRUZIONI ELETTRONICHE		Data: 31 Gennaio 2012
Cognome _____	Valutazione	
Nome _____		
Tempo disponibile: 20'	Valutazione:..... Solo una risposta è corretta. Risposta esatta: 1; nessuna risposta: 0; risposta errata: -0.33. Non si possono consultare testi o appunti	

Per quale scopo si definisce il “tipo” di un pin in un simbolo usato per indicare un componente in uno schema elettrico?

- Tramite il tipo si indica al simulatore logico se un pin agisce con logica affermata o negata
- Il tipo è associato a una forma grafica che permette di avere una documentazione chiara e completa
- Il tipo del pin permette di associare una larghezza predefinita alle piste collegate nel PCB
- Tramite il tipo si indicano al programma di verifica delle caratteristiche elettriche che permettono test formali di coerenza per evidenziare errori od omissioni

Quali sono le principali proprietà del pin di un simbolo associato a un componente, in uno schema elettrico?

- Tempo di ritardo, tempo di salita/discesa, frequenza massima
- Colore, spessore, lunghezza
- Forma, tipo, nome, numero
- Resistenza, induttanza, capacità parassita

In uno schema elettrico diversi simboli sono individuati dallo stesso numero di riferimento, a cui è aggiunta una differente lettera. Perché?

- Si tratta di parti diverse di un solo componente multiparte
- Non sono mai ammesse lettere oltre quelle iniziali (R per le resistenze, C per i condensatori, U per gli integrati, ecc.) nella specificazione di un riferimento
- Si tratta di simboli che indicano componenti da montare in alternativa
- Si tratta di varianti dello stesso componente con tempi di ritardo diversi

Quale spiegazione può darsi al fatto che, durante il progetto, in uno schema elettrico diversi simboli dichiarano tutti lo stesso valore?

- Si tratta di componenti simili tra loro a cui è stata eventualmente associata una forma grafica diversa
- Il CAD impedisce in generale di usare per due simboli diversi lo stesso valore
- Tutti i simboli con lo stesso valore indicano il medesimo componente, e il CAD collega automaticamente tra loro i nodi relativi ai pin corrispondenti
- Si tratta di una fase del progetto preliminare, precedente l'annotazione; poi il software di annotazione associerà ai simboli valori diversi

Nel disegno dei layer “silk screen” occorre prestare attenzione a ...

- non scrivere in corrispondenza di piste sottostanti
- usare precisi colori per i diversi elementi grafici usati
- a “specchiare” le scritte sul lato top
- evitare di scrivere testo o grafica in corrispondenza dei pad per la saldatura dei componenti

Per quale motivo alla fine del progetto geometrico è bene eseguire una verifica complessiva delle regole di progetto, anche se durante il disegno si è usata la verifica “on line”?

- Perché la verifica in linea si limita a verificare le regole relative a un singolo layer
- La verifica finale tiene conto anche dei risultati della simulazione elettrica
- Perché comunemente la verifica on line è limitata a una parte dell'area di progetto ed esegue verifiche parziali per non rallentare il disegno
- Non è vero: la verifica in linea dà sufficienti garanzie

Che cos'è una via nel progetto di un PCB?

- Un passaggio conduttore tra i pad di un footprint
- Uno scasso da realizzare per fresatura
- Si tratta di un foro metallizzato che ha l'unico scopo di mettere in contatto piste su layer diversi
- L'insieme di più moduli saldati lungo una direzione rettilinea

Come viene rappresentata una via nello schema elettrico?

- Una crocetta posta in corrispondenza di alcuni pin
- Una etichetta alfanumerica che assegna un nome a un nodo elettrico
- Un semplice pallino che indica la presenza di connessione tra fili in contatto
- Di norma le vie appartengono al progetto geometrico e non hanno un equivalente nello schema elettrico

Come si possono preservare i riferimenti dei simboli già espressi direttamente dal progettista in uno schema elettrico e attribuire ai simboli non identificati un riferimento automatico?

- Usando lo strumento di annotazione assoluta
- Facendo girare lo strumento di verifica delle regole elettriche
- Usando lo strumento di annotazione incrementale
- Usando una tabella di associazione simbolo/riferimento

Perché il tempo di ripristino dei diodi intrinseci dei MOSFET ha diretta influenza sulla generazione di disturbi elettromagnetici di un amplificatore in classe D?

- Perché questi diodi entrano in conduzione quando la corrente nel carico viene interrotta dall'apertura di entrambi i MOS
- Perché un tempo morto troppo breve provoca picchi di corrente elevati in ciascun ramo del ponte
- Perché un tempo di ripristino elevato del diodo corrispondente al MOS interdetto corrisponde a una carica significativa che deve essere fornita in corrispondenza di ogni commutazione dal MOS dello stesso lato del ponte che entra in conduzione
- Perché il tempo di ripristino si somma in modo differente al tempo di conduzione del lato alto o basso del ramo del ponte pilotato, dipendentemente dal verso della corrente di uscita

Quali informazioni contiene preferibilmente un file di foratura per la realizzazione di un PCB?

- L'elenco delle coordinate dei fori e delle reti elettriche a cui ogni foro è associato
- L'elenco ordinato secondo X e poi Y delle coordinate dei fori, con l'indicazione del diametro
- L'elenco delle coordinate dei fori, in ordine casuale, con l'indicazione del diametro
- L'elenco delle coordinate dei fori, raggruppate in base al diametro del foro, e ordinate in modo da minimizzare la distanza da un foro al successivo

Come conviene ordinare i valori di un parametro numerico in una tabella di selezione parametrica fornita da un distributore che offre prodotti di costruttori diversi?

- In ordine alfabetico, trascurando maiuscole o minuscole

- In ordine di valore crescente o decrescente, considerando l'unità di misura scelta dal costruttore
- In ordine crescente o decrescente, secondo il valore numerico indicato dal costruttore
- In ordine alfabetico, considerando minuscole o maiuscole

Perché il fenomeno del “power supply pumping” è significativo solo negli amplificatori in classe D half bridge?

- Negli amplificatori half bridge, a differenza di quelli full bridge, si ha una tensione di uscita la cui ampiezza vale al massimo la metà della tensione presente tra i due binari di alimentazione
- Negli amplificatori full bridge la corrente che durante una semionda tende ad aumentare in modulo il valore di uno dei binari di alimentazione è compensata dalla corrente di segno opposto che scorre nell'altro ramo del ponte
- Perché negli amplificatori half bridge occorre usare nel filtro di uscita un induttore di valore doppio rispetto a quello degli amplificati full bridge
- Non è vero: il pumping è ugualmente significativo anche degli amplificatori full bridge

Quale grandezza fisica ha il principale impatto sulla massima tensione di lavoro a cui può lavorare un condensatore?

- La resistività dell'isolante e la superficie delle armature
- La conducibilità elettrica delle armature e la resistività dell'isolante
- La rigidità dielettrica dell'isolante e la distanza tra le armature
- Le conducibilità termiche delle armature e dell'isolante interposto

Quale di questi è un aspetto positivo dei resistori a impasto?

- Hanno coefficiente di temperatura positiva
- Sono molto precisi
- Presentano bassa induttanza parassita
- Sono in grado di ricoprire una gamma di valori dai milliohm ai megaohm

Che tipo di package viene indicato dalla sigla 0402?

- È il package assiale tipico dei resistori da 1/4 di watt
- È il package di un condensatore ceramico da 400 pF
- Un package quadrato caratterizzato da contatti su una sola faccia
- Un package rettangolare a due terminali per SMD dalle dimensione di circa 40x20 mil²

Che relazione esiste tra capacità, tensione massima di lavoro ed energia massima immagazzinata per un condensatore di data tecnologia?

- L'energia è proporzionale al prodotto tra capacità e tensione di lavoro.
- L'energia è proporzionale alla capacità e al quadrato della tensione di lavoro.
- L'energia è proporzionale alla capacità e inversamente proporzionale alla tensione di lavoro.
- L'energia è proporzionale al quadrato della capacità e alla tensione di lavoro.

Per un condensatore reale, quale grandezza viene modellata da una resistenza in parallelo alla capacità?

- Gli effetti ad alte frequenze (skin effect)
- L'induttanza parassita dei reofori collegati alle armature
- Le perdite nel dielettrico per polarizzazione e dovute alla resistenza dei conduttori
- La corrente di perdita attraverso il dielettrico

Per quale aspetto gli induttori avvolti su nucleo ferromagnetico sono migliori di quelli in aria?

- Presentano maggiore linearità
- Presentano Q superiore alle altissime frequenze
- Risentono meno dei campi magnetici esterni
- Possono essere realizzati con valori di induttanza molto elevati

Quale processo tecnologico è indispensabile per la realizzazione di PCB multilayer e non per un processo singola faccia per componenti through hole?

- Deposizione di fotoresist
- Deposizione di rame su dielettrico
- Scontornatura
- Foratura

Che differenza c'è tra via sepolta e via cieca?

- La via cieca permette di connettere strati non adiacenti
- La via sepolta riguarda strati interni, quella cieca unisce uno strato estremo con uno o più strati adiacenti
- Nessuna, sono diverse definizioni della stessa cosa
- La via cieca, a differenza di quella sepolta, prevede un processo di planarizzazione per evitare deformazioni degli strati adiacenti

Quali informazioni deve fornire solitamente il progettista all'azienda che realizza il PCB?

- Le regole per garantire l'integrità dei segnali e per il corretto progetto termico
- I datasheet dei componenti elettronici usati e lo schema elettrico
- I file per le maschere prodotti dal CAD e quelli per la foratura
- La stampa a colori di tutti i layer del PCB

Che cosa è la "ratnest"?

- Il contorno della scheda
- Una rappresentazione grafica senza dimensioni né vincoli delle connessioni tra i pin dei moduli
- Una rappresentazione grafica delle connessioni tra i pin dei moduli che tiene conto della impenetrabilità dei package dei dispositivi
- Un algoritmo per il piazzamento automatico dei footprint nel progetto geometrico del PCB

Cos'è un guasto intermittente?

- È un guasto che comporta il mancato rispetto dei tempi di setup e di hold dei circuiti sincroni
- È un guasto la cui presenza si alterna a periodi di corretto funzionamento
- È un guasto che dopo aver manifestato il suo effetto sparisce senza lasciare tracce
- È un guasto legato alla variazione di tensione in circuiti RC

Come viene definito il tratto iniziale della curva a vasca da bagno?

- Burn in
- Mortalità infantile
- Vecchiaia
- Zona di funzionamento a tasso di guasto costante

Quanto vale l'affidabilità di un sistema, funzionalmente costituito da 3 sottosistemi uguali indipendenti di affidabilità 0,6 connessi due in parallelo e in serie al terzo?

- 0,60
- 0,80
- 0,50
- 0,30

Quale è l'affidabilità per il tempo di missione di un decennio di un sistema che presenta tasso di guasto costante e pari a un guasto ogni secolo?

- 50%
- 3%
- 90%
- 10%

Quale meccanismo sfruttano le prove accelerate di affidabilità?

- L'attribuzione di parametri di frequenza, gravità e rivelabilità a ogni tipologia di guasto
- L'analisi dettagliata dei guasti rilevati durante il normale funzionamento di un componente
- La valutazione teorica delle relazioni funzionali tra elementi di un componente e della relativa affidabilità eseguita rapidamente tramite computer
- L'esposizione di lotti di componenti a condizioni ambientali e di temperatura limite e la presenza di modelli matematici di accelerazione

Quale potenza deve poter dissipare un transistor usato in un amplificatore in classe A, con accoppiamento a trasformatore, da 100 W di uscita?

- 20 W
- 5 W
- 50 W
- 100 W

Che cos'è il flussante?

- Un lubrificante che facilita il montaggio di componenti through-hole
- Una sostanza chimica che elimina l'ossido e migliora la bagnabilità del rame durante la saldatura
- Un grasso che migliora la conducibilità termica del contatto tra case e dissipatore
- Un liquido a elevata capacità termica usato negli scambiatori di tipo "heat pipe"

Che cosa è il "thermal relief"?

- Uno strato termicamente isolante posto sopra le piste per salvarle durante la fase di saldatura a riflusso
- Una ampia area di rame predisposta su PCB per favorire la dissipazione di calore di un componente in stretto contatto con essa
- Una connessione a bassa resistenza termica tra una via e un piano conduttore
- Una connessione a bassa conducibilità termica tra una via e un piano conduttore

COSTRUZIONI ELETTRONICHE		Data: 14 Febbraio 2012
Cognome _____	Test	Valutazione
Nome _____	Posizione:	
Tempo disponibile: 20' Valutazione:..... Solo una risposta è corretta. Risposta esatta: 1; nessuna risposta: 0; risposta errata: -0.33. Non si possono consultare testi o appunti		

1 Quali sono le principali proprietà di un pin di un simbolo usato per indicare un componente in uno schema elettrico?

- Qualità, costo, tempo di ritardo, frequenza massima
- Colore, spessore, lunghezza
- Forma, tipo, nome, numero
- Resistenza, induttanza, capacità parassita

2 Per quale scopo si attribuisce al pin un numero?

- Il numero determina il nome che il CAD darà alla rete di interconnessione relativa
- Il numero serve a documentare nel simbolo la funzione stessa del pin nel chip
- Il numero permette di associare il pin al conduttore corrispondente del footprint
- Il numero aiuta ad associare al pin la dimensione della pista della rete corrispondente

3 Quale spiegazione può darsi al fatto che, durante il progetto, in uno schema elettrico diversi simboli hanno tutti lo stesso riferimento?

- Il CAD impedisce in generale di usare per due simboli diversi lo stesso riferimento
- Tutti i simboli con lo stesso riferimento indicano il medesimo componente, e il CAD collega automaticamente tra loro i nodi relativi ai pin corrispondenti
- Si tratta di componenti uguali tra loro
- Si tratta di una fase del progetto preliminare, precedente l'annotazione

4 In uno schema elettrico diversi simboli sono individuati dallo stesso numero di riferimento, a cui è aggiunta una differente lettera. Perché?

- Si tratta di varianti dello stesso componente con tempi di ritardo diversi
- Si tratta di parti diverse di un solo componente multiparte
- Si tratta di simboli che indicano componenti da montare in alternativa
- Non sono mai ammesse lettere oltre quelle iniziali (R per le resistenze, C per i condensatori, U per gli integrati, ecc.) nella specificazione di un riferimento

5 Nel disegno dei layer "silk screen" occorre prestare attenzione a ...

- Alle piste sottostanti
- Al colore degli elementi grafici usati
- A "specchiare" le scritte sul lato top
- Evitare di scrivere testo o grafica in corrispondenza dei pad per la saldatura dei componenti

6 Per quale motivo alla fine del progetto geometrico è bene eseguire una verifica complessiva delle regole di progetto, anche se durante il disegno si è usata la verifica "on line"?

- Perché la verifica in linea si limita a verificare le regole relative a un singolo layer
- La verifica finale tiene conto anche dei risultati della simulazione elettrica
- Perché comunemente la verifica on line è limitata a una parte dell'area di progetto ed esegue verifiche parziali per non rallentare il disegno
- Non è vero: la verifica in linea dà sufficienti garanzie

7 In cosa consiste una “giunzione” nello schema elettrico?

- Una crocetta posta in corrispondenza di alcuni pin
- Una etichetta alfanumerica che assegna un nome a un nodo elettrico
- Un semplice pallino che indica la presenza di connessione tra fili in contatto
- Un simbolo grafico che indica la necessità di eseguire una saldatura sul PCB corrispondente

8 Che cos'è una via nel progetto di un PCB?

- Un passaggio conduttore tra i pad di un footprint
- Uno scasso da realizzare per fresatura
- Si tratta di un foro metallizzato che ha l'unico scopo di mettere in contatto piste su layer diversi
- L'insieme di più moduli saldati lungo una direzione rettilinea

9 Che cos'è l'annotazione incrementale di uno schema elettrico?

- L'apposizione di commenti essenziali nello schema elettrico
- L'attribuzione di un numero progressivo all'etichetta di riferimento di ciascun componente che non sia ancora stato precisato dal progettista
- L'attribuzione di un numero progressivo all'etichetta di riferimento di ciascun componente presente nello schema
- L'attribuzione di un numero progressivo all'etichetta di valore di ciascun componente che non sia ancora stata precisato dal progettista

10 Come vengono passate in un CAD le informazioni dallo schema elettrico al disegno del PCB?

- Tramite uno strumento grafico detto “ratsnet”
- Tramite un file di netlist, il cui formato è definito da appositi standard
- Manualmente, dal progettista
- Tramite il file che descrive lo schema, costituito essenzialmente da una mappa di bit

11 Perché il “dead time” ha diretta influenza sulla THD di un amplificatore in classe D?

- Perché la corrente nel carico viene interrotta dall'apertura di entrambi i MOS
- Perché un tempo morto troppo breve provoca picchi di corrente elevati in ciascun ramo del ponte
- Perché durante il tempo morto il circuito di uscita è più sensibile ai disturbi
- Perché il tempo morto si somma in modo differente al tempo di conduzione del lato alto o basso del ramo del ponte pilotato, dipendentemente dal verso della corrente di uscita

Perché il fenomeno del “power supply pumping” è significativo solo negli amplificatori in classe D half bridge?

- Negli amplificatori half bridge, a differenza di quelli full bridge, si ha una tensione di uscita la cui ampiezza vale al massimo la metà della tensione presente tra i due binari di alimentazione
- Negli amplificatori full bridge la corrente che durante una semionda tende ad aumentare in modulo il valore di uno dei binari di alimentazione è compensata dalla corrente di segno opposto che scorre nell'altro ramo del ponte
- Perché negli amplificatori half bridge occorre usare nel filtro di uscita un induttore di valore doppio rispetto a quello degli amplificati full bridge
- Non è vero: il pumping è ugualmente significativo anche degli amplificatori full bridge

Che cosa fa un filtro in una tabella di selezione parametrica?

- Permette di selezionare solo i componenti della tabella che rispettano certe caratteristiche, indicate generalmente tramite semplici operatori logici

- Garantisce la pulizia delle schede dai residui della saldatura
- Elimina le frequenze indesiderate secondo parametri impostabili
- Fa passare i parametri il cui valore è inferiore a una soglia impostabile

14 Quale grandezza fisica ha il principale impatto sulla massima corrente istantanea sopportabile da un resistore di valore e volume dato?

- La capacità termica specifica del conduttore
- La conducibilità elettrica del conduttore
- La rigidità dielettrica dell'isolante circostante
- La conducibilità termica del materiale che circonda il materiale conduttore

15 Che tipo di package viene indicato dalla sigla SIP10?

- È il package assiale tipico dei resistori da 10 di watt
- È il package di un condensatore ceramico da 10 pF
- Un package rettangolare con piccolo fattore di forma caratterizzato da 10 pin su un sola linea
- Un package rettangolare a due terminali per SMD dalle dimensione di circa 10x10 mil²

16 Quale è il principale aspetto positivo dei resistori a film sottile?

- Sono poco costosi
- Sono molto precisi
- Presentano bassa capacità parassita
- Sono in grado di ricoprire un'ampia gamma di valori

17 Che relazione esiste tra capacità, tensione massima di lavoro e volume per un condensatore di data tecnologia?

- Il volume è proporzionale al prodotto tra capacità e tensione di lavoro.
- Il volume è proporzionale alla capacità e al quadrato della tensione di lavoro.
- Il volume è proporzionale alla capacità e inversamente proporzionale alla tensione di lavoro.
- Il volume è proporzionale alla capacità e indipendente dalla tensione di lavoro.

18 Per un condensatore reale, quale grandezza viene modellata da una resistenza in serie alla capacità dipendente dalla frequenza?

- Gli effetti ad alte frequenze (skin effect)
- L'induttanza parassita dei reofori collegati alle armature
- Le perdite nel dielettrico per polarizzazione e dovute alla resistenza dei conduttori
- La corrente di perdita

Per quali aspetti gli induttori in aria sono peggiori di quelli avvolti su nucleo ferromagnetico?

- È più difficile realizzare induttori lineari
- Provocano più disturbi nei circuiti circostanti
- Risentono maggiormente dei campi magnetici esterni
- Sono più difficili da realizzare

20 Quale processo tecnologico è indispensabile per la realizzazione di PCB multilayer e non per un processo singola faccia per componenti through hole?

- Laminazione del tessuto di vetro con resina
- Deposizione di rame su dielettrico per realizzare le vie metallizzate
- Scontornatura
- Foratura

21 Che differenza c'è tra via sepolta e via cieca?

- La via cieca permette di connettere strati non adiacenti
- La via sepolta riguarda strati interni, quella cieca unisce uno strato estremo con uno o più strati

adiacenti

- Nessuna, sono diverse definizioni della stessa cosa
- La via cieca, a differenza di quella sepolta, prevede un processo di planarizzazione per evitare deformazioni degli strati adiacenti

22x Quali informazioni deve fornire solitamente il progettisti all'azienda che realizza il PCB?

- Le regole per garantire l'integrità dei segnali e per il corretto progetto termico
- I datasheet dei componenti elettronici usati e lo schema elettrico
- I file per le maschere prodotti dal CAD e quelli per la foratura
- La stampa a colori di tutti i layer del PCB

Che cosa è la "ratnest"?

- Il contorno della scheda
- Una rappresentazione grafica delle connessioni tra i pin dei moduli che tiene conto della impenetrabilità dei package dei dispositivi
- Una rappresentazione grafica senza dimensioni né vincoli delle connessioni tra i pin dei moduli
- Un algoritmo per il piazzamento automatico dei footprint nel progetto geometrico del PCB

Cos'è un guasto intermittente?

- È un guasto che comporta il mancato rispetto dei tempi di setup e di hold dei circuiti sincroni
- È un guasto la cui presenza si alterna a periodi di corretto funzionamento
- È un guasto che dopo aver manifestato il suo effetto sparisce senza lasciare tracce
- È un guasto legato alla variazione di tensione in circuiti RC

Come viene definito il tratto iniziale della curva a vasca da bagno?

- Fase di burn in
- Mortalità infantile
- Schienale anteriore
- Sezione di riempimento

Quanto vale l'affidabilità di un sistema, funzionalmente costituito da 5 sottosistemi uguali indipendenti in parallelo di affidabilità 0,3?

- 1,5
- 0,00243
- 0,99757
- 0,5

Quale è l'affidabilità per il tempo di missione di 2 anni di un sistema che presenta tasso di guasto costante e pari a 2 guasti l'anno?

- 5.2%
- 20.4%
- 1.8%
- 4%

Quale meccanismo sfruttano le prove accelerate di affidabilità?

- L'attribuzione di parametri di frequenza, gravità e rivelabilità a ogni tipologia di guasto
- L'analisi dettagliata dei guasti rilevati durante il normale funzionamento di un componente
- La valutazione teorica delle relazioni funzionali tra elementi di un componente e della relativa affidabilità eseguita rapidamente tramite computer
- L'esposizione di lotti di componenti a condizioni ambientali e di temperatura limite e la presenza di modelli matematici di accelerazione

Quanto vale l'affidabilità di un sistema, funzionalmente costituito da 5 sottosistemi uguali

indipendenti in serie di affidabilità 0,3?

- 1,5
- 0,00243
- 0,99757
- 0,5

30 Quanto vale il massimo rendimento di un amplificatore in classe A accoppiato a trasformatore?

- 25%
- 50%
- 78%
- 12.5%

31 Perché la rete di polarizzazione di un amplificatore in classe AB accoppiato con trasformatori a presa centrale non può essere filtrata con un condensatore?

- Perché il condensatore introdurrebbe armoniche di frequenza multipla di quella del segnale
- Perché il punto di riposo verrebbe a dipendere dall'ampiezza del segnale
- Perché il condensatore sarebbe soggetto a tensioni impulsive distruttive
- Non è vero, si usa normalmente un condensatore per filtrare la tensione di base dei transistori.