



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FIRENZE
SCUOLA DI INGEGNERIA - DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
DELL'INFORMAZIONE

Tesi di Laurea Triennale in Ingegneria Informatica

**CONFRONTO RAGIONATO SUI SOFTWARE PER LA
SIMULAZIONE DEI CIRCUITI ELETTRICI ED
ELETTRONICI**

Candidato
Lorenzo Cappetti

Relatori
Prof. Antonio Luchetta
Prof. Gabriele Maria Lozito

Anno Accademico 2022/2023

Indice

Introduzione alla simulazione circuitale analogica	i
1 Simulatore analogico di tipo simbolico e numerico: caratteristiche e confronti	1
1.1 Approccio alla programmazione dei simulatori simbolici	1
1.2 Approccio alla programmazione dei simulatori numerici	3
2 Applicazioni di simulatori analogici numerici	5
2.1 LTspice	5
2.1.1 Algoritmo di LTspice	6
2.1.2 Analisi .DC	11
2.1.3 Componenti non lineari	14
2.1.4 Analisi .TRANS	16
2.1.5 Analisi .AC	18
2.2 PLECS	19
2.2.1 Modellazione di Sistemi Dinamici	19
2.2.2 Simulazione dei circuiti dinamici	21
2.2.3 Esecuzione del Modello	24
2.2.4 Simulazione a Passo Fisso	27
2.2.5 Discretizzazione del Modello Fisico	27

3	Applicazioni di simulatori analogici simbolici	31
3.1	SapWin	32
3.1.1	Algoritmo Risolutivo	32
4	Confronto ragionato tra simulatori simbolici e numerici	38
4.1	Introduzione ai Filtri Elettronici	38
4.1.1	Gli Amplificatori Operazionali nei Filtri Attivi	39
4.1.2	Classificazione dei Filtri	41
4.2	Filtro Tow-Thomas	42
4.3	PLECS	46
4.4	LTSpice	50
4.5	SapWin	52
5	Sviluppi futuri	56
5.1	Sviluppi futuri	56
6	Conclusioni	58
6.1	LTSpice e PLECS a confronto	59
6.2	Simulatori analogici numerici e simbolici a confronto	60
6.3	Conclusioni finali	61
7	Ringraziamenti	63
	Bibliografia	65

Introduzione alla simulazione circuitale analogica

Nel vasto campo dell'ingegneria e in particolare in quello dell'analisi dei circuiti, l'utilizzo di simulatori svolge un ruolo cruciale nel fornire una comprensione approfondita del comportamento e delle caratteristiche dei circuiti. In questo contesto i simulatori analogici emergono come strumenti di primaria importanza, offrendo la possibilità di modellare e analizzare circuiti elettronici reali all'interno di un ambiente virtuale. Questa capacità consente agli ingegneri di esplorare e ottimizzare i propri progetti senza la necessità di affrontare il processo dispendioso e costoso di costruzione di prototipi fisici.

Tra i diversi tipi di simulatori analogici disponibili, si distinguono due categorie: i simulatori analogici numerici e i simulatori analogici simbolici. Nonostante condividano l'obiettivo fondamentale di analizzare circuiti elettronici, queste due tipologie si differenziano significativamente per l'approccio utilizzato nel trattamento dei dati e nella rappresentazione dei componenti. Mentre i simulatori analogici numerici si concentrano sull'elaborazione di dati tramite algoritmi numerici e modelli matematici per simulare il comportamento dei circuiti, i simulatori analogici simbolici si basano su rappresentazioni simboliche dei componenti e delle equazioni, consentendo una visione più astratta e concettuale del sistema in esame.

Capitolo 1

Simulatore analogico di tipo simbolico e numerico: caratteristiche e confronti

Come abbiamo detto nell'introduzione, andremo ad analizzare i due tipi di simulatori analogici: **Simbolici** e **Numerici**.

1.1 Approccio alla programmazione dei simulatori simbolici

I simulatori analogici di tipo simbolico si basano sulla rappresentazione simbolica dei componenti e delle equazioni che descrivono il comportamento dei circuiti. Questo approccio consente una modellazione più astratta e concettuale dei circuiti, permettendo agli ingegneri di ottenere una visione globale del sistema in esame. Il simulatore simbolico che andremo ad analizzare è SapWin.

Le caratteristiche principali di questi simulatori sono:

- **Rappresentazione simbolica** : I componenti e le equazioni dei circuiti sono espressi mediante simboli e formule matematiche, rendendo più intuitiva la comprensione del funzionamento del circuito.
- **Analisi teorica** : I simulatori analogici simbolici consentono di condurre analisi teoriche dettagliate, come l'analisi di nodi e di maglia, per comprendere il comportamento del circuito in diverse condizioni di funzionamento.
- **Flessibilità concettuale** : Grazie alla rappresentazione simbolica, i simulatori di tipo simbolico offrono una maggiore flessibilità concettuale, permettendo agli ingegneri di esplorare diverse configurazioni e topologie di circuiti senza dover ricorrere a dettagli numerici.
- **Precisione** : Questo tipo di simulatori analogici hanno una precisione maggiore per i circuiti che presentano componenti lineari, poiché restituiscono un risultato simbolico e quindi senza approssimazioni.
- **Estendibilità e ripetibilità** : Nei simulatori simbolici è decisamente più semplice estendere i circuiti e ripeterne l'esecuzione, poiché comporta una spesa computazionale minore in quanto non si va a risimulare tutto il circuito ma solamente la parte interessata.
- **Analisi parametrica** : I simulatori simbolici consentono di condurre analisi parametriche per variazioni dei parametri dei componenti sulle prestazioni del circuito, facilitando il processo di ottimizzazione del design.

- **Dimensioni** : un punto a sfavore è la dimensione, in quanto più componenti sono presenti all'interno del circuito più sarà lunga e complicata la formula risultante.

1.2 Approccio alla programmazione dei simulatori numerici

I simulatori analogici numerici sono strumenti basati sull'uso di modelli matematici e algoritmi numerici per simulare il comportamento dei circuiti elettronici nel dominio del tempo. Utilizzando metodi di risoluzione numerica, questi simulatori valutano le equazioni differenziali che descrivono il circuito e ne determinano la risposta nel tempo. Questo approccio è particolarmente efficace per analizzare circuiti non lineari e dinamici, consentendo di valutare parametri come tensioni, correnti e potenze in funzione del tempo. I simulatori analogici numerici che andremo a valutare sono PLECS e LTspice.

Le caratteristiche principali di questi simulatori sono:

- **Elaborazione numerica** : Questi simulatori utilizzano algoritmi numerici per risolvere le equazioni differenziali che descrivono il comportamento dei circuiti, consentendo una simulazione dettagliata del circuito.
- **Precisione** : Grazie all'approccio numerico, i simulatori analogici di tipo numerico offrono una maggiore precisione nei risultati per circuiti con componenti **non lineari**, consentendo agli ingegneri di ottenere valutazioni quantitative più accurate del comportamento del circuito.

- **Dimensioni** : La simulazione numerica, a differenza di quella simbolica, non crea difficoltà di lettura del risultato per circuiti che presentano più componenti, rendendolo quindi ottimo per circuiti molto grandi.

Capitolo 2

Applicazioni di simulatori analogici numerici

2.1 LTspice

LTspice [1] è un software per la simulazione di circuiti elettronici analogici basato su SPICE, sviluppato dal produttore di semiconduttori Analog Devices (originariamente da Linear Technology). È il software basato sul motore SPICE più distribuito e utilizzato nell'industria. Sebbene sia gratuito, LTspice non è limitato artificialmente nelle sue capacità (nessun limite di funzionalità, nodi, componenti o sottocircuiti). Include una libreria di modelli SPICE da Analog Devices, Linear Technology, Maxim Integrated e altre fonti di terze parti. [10]

Il software permette diversi tipi di analisi:

- Analisi DC (utilizzando il comando `.DC`)
- Analisi nel tempo (comando `.TRANS`)
- Analisi AC (comando `.AC`)

Andremo poi a fare una distinzione di queste 3 tipologie di analisi.

2.1.1 Algoritmo di LTspice

Andiamo a introdurre con questa immagine l'algoritmo che LTspice utilizza per analizzare i circuiti.

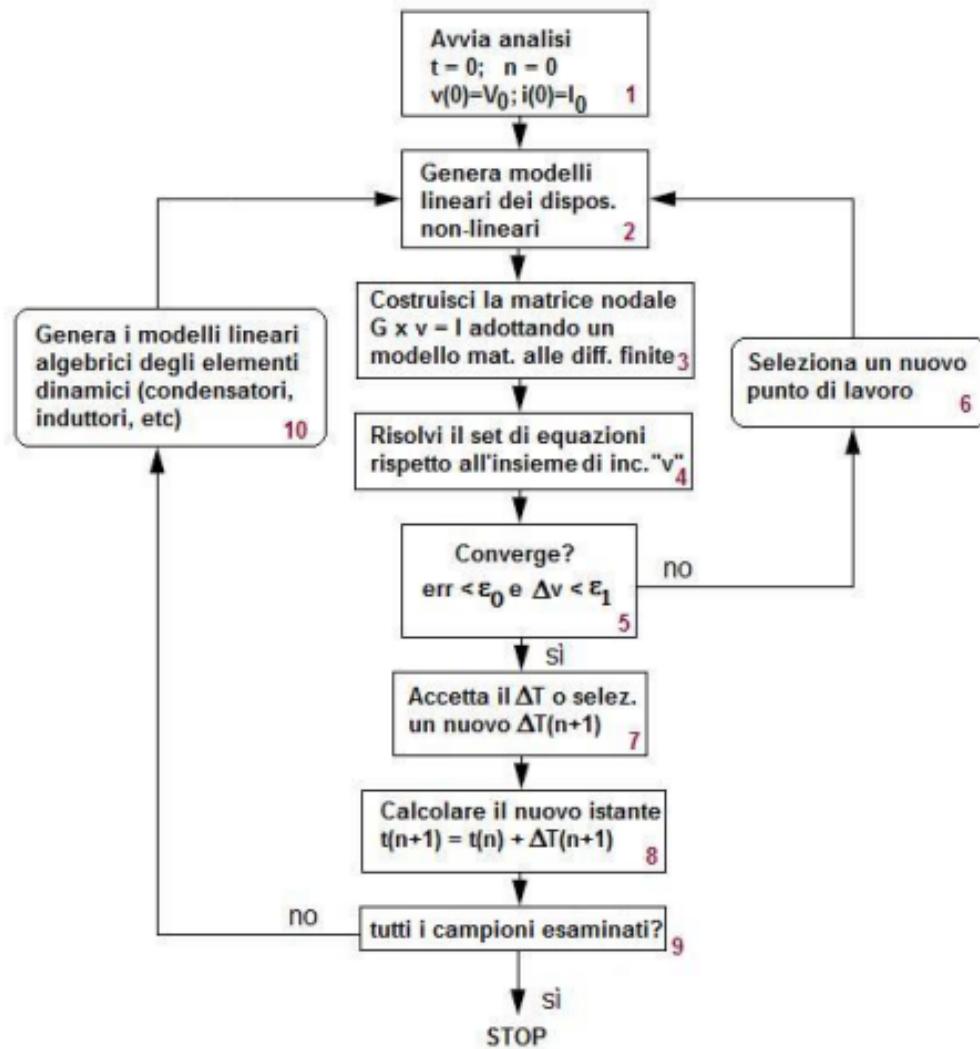


Figura 2.1: Diagramma di Flusso di LTspice

Blocco 1. Per cominciare l'analisi viene stabilito un tempo iniziale $t = 0$ e un $n = 0$, ponendo così una tensione iniziale $v(0) = v_0$ e una corrente iniziale $i(0) = i_0$.

Blocco 2. Il punto 2 del diagramma di flusso tratta la generazione dei modelli lineari per dispositivi non lineari. In questa fase, il comportamento intrinsecamente non lineare di componenti come i transistor, i diodi o altri dispositivi simili viene approssimato con un modello lineare attorno a un punto di lavoro specifico. Questo è essenziale per l'analisi dei circuiti utilizzando metodi numerici, poiché la soluzione diretta di modelli non lineari può essere molto complessa o impossibile.

Blocco 3. Il punto 3 si concentra sulla costruzione della matrice nodale $G \times x = I$, che è un passaggio fondamentale nella simulazione dei circuiti. Questa matrice rappresenta le relazioni di corrente e tensione in tutti i nodi del circuito, tranne il nodo di riferimento (solitamente il terreno o GND). La matrice nodale si ottiene applicando le leggi di Kirchhoff dei circuiti e altre relazioni costitutive (come la legge di Ohm) ai vari elementi del circuito. Il risultato è un sistema di equazioni lineari che descrivono il comportamento del circuito. In questa fase, il simulatore organizza le equazioni in modo tale da prepararle per la risoluzione numerica.

Blocco 4. Nel quarto punto, "Risolvi il set di equazioni", il diagramma descrive il passo del processo di simulazione circuitale in cui viene risolto il set di equazioni lineari risultanti dalla linearizzazione dei componenti non lineari e dalla modellazione degli elementi del circuito. Questo step è fondamentale perché è il momento in cui il simulatore applica metodi numerici per calcolare i valori di tensione e corrente in tutto il circuito. In questo passo specifico, il simulatore utilizza le equazioni generate precedentemente, che descrivono il comportamento dei vari componenti sotto forma di una matrice

nodale. Questa matrice comprende termini che rappresentano la conduttanza (o resistenza), sorgenti di corrente e tensione, nonché le relazioni tra i nodi nel circuito (ad esempio, la legge di Kirchhoff sulle correnti e le tensioni).

Blocco 5. Il blocco seguente del diagramma di flusso, dopo la risoluzione del set di equazioni, è il controllo della convergenza. Il processo di simulazione deve verificare se la soluzione corrente è accettabile o meno, ovvero se i risultati hanno raggiunto un grado di precisione sufficiente per essere considerati validi. Questo è fatto confrontando l'errore attuale, che è la differenza tra i valori correnti e quelli dell'iterazione precedente, con un valore di soglia predefinito, noto come tolleranza. Nel diagramma, la decisione di convergenza è rappresentata come una domanda "Converge?" con due esiti possibili:

- Se la risposta è "sì", significa che l'errore è inferiore alle tolleranze stabilite, e il processo può passare alla verifica del passo di integrazione o selezionare un nuovo passo di integrazione per il calcolo dello stato successivo del circuito.
- Se la risposta è "no", significa che l'errore è ancora troppo grande e la simulazione deve continuare iterando, potenzialmente con un aggiustamento nel punto di lavoro o nei parametri del modello per migliorare la precisione della soluzione nel prossimo ciclo.

Blocco 6. Il blocco "Seleziona un nuovo punto di lavoro" all'interno del diagramma di flusso è un punto critico nel processo di simulazione, particolarmente quando la soluzione corrente non converge entro le tolleranze stabilite. Questo passo indica che il simulatore deve scegliere un nuovo set di condizioni iniziali o parametri—spesso chiamato "punto di lavoro" o "ope-

rating point"—per tentare una nuova iterazione nella risoluzione del sistema di equazioni.

Blocco 7. Il blocco "Accetta ΔT o selez." si riferisce al passo della simulazione in cui si decide se accettare il passo di tempo corrente, indicato con ΔT , oppure se selezionare un nuovo passo di tempo $\Delta T(n+1)$ per il calcolo dello stato successivo. In un simulatore circuitale, il passo di tempo ΔT è un parametro critico nel controllo della simulazione transitoria, ovvero dell'analisi del comportamento del circuito nel tempo. La scelta di ΔT influisce direttamente sulla precisione e sulla stabilità della simulazione:

- Se ΔT è troppo grande, la simulazione potrebbe non catturare adeguatamente i rapidi cambiamenti di stato del circuito, portando a risultati inaccurati.
- Se ΔT è troppo piccolo, la simulazione diventa più accurata ma richiede più tempo computazionale e può generare numerose iterazioni, rallentando il processo.

L'accettazione di ΔT significa che il simulatore ha determinato che la soluzione per l'attuale passo di tempo è sufficientemente precisa per le tolleranze impostate e quindi può procedere al calcolo del prossimo stato del circuito al tempo successivo $\Delta T(n+1)$.

Se invece il simulatore determina che la soluzione non è sufficientemente precisa, sarà necessario selezionare un nuovo $\Delta T(n+1)$. Questo può significare diminuire il passo di tempo per migliorare la precisione o modificarlo in base a specifici criteri di controllo dell'errore integrati nel simulatore.

Blocco 8. In questo blocco si calcola un nuovo istante di tempo, che è un aggiornamento temporale: $t(n+1) = t(n) + \Delta T(n+1)$

Blocco 9. Il blocco di verifica "tutti i campioni esaminati?" si trova verso la fine del processo di simulazione circuitale delineato nel diagramma di flusso. In questo punto del processo, il simulatore controlla se l'analisi ha esaminato tutti i punti di tempo (campioni) che erano stati pianificati per essere analizzati durante la simulazione. Nella pratica il simulatore :

- Controlla se il tempo corrente di simulazione ha raggiunto il tempo finale specificato dall'utente per l'analisi.
- Valuta se tutte le condizioni o eventi specificati che dovevano essere esaminati nel circuito sono stati effettivamente osservati e registrati.

Se la risposta a questa verifica è "sì", il processo di simulazione può fermarsi perché ha completato il suo compito di analizzare il comportamento del circuito per l'intera durata specificata. Questo implica che i dati di output ora contengono informazioni complete sull'andamento dei vari nodi e componenti nel tempo, e questi dati possono essere utilizzati per ulteriori analisi o per il reporting. Se invece la risposta è "no", significa che ci sono ancora punti di tempo (campioni) che devono essere esaminati. Di conseguenza, il simulatore dovrà continuare il processo di simulazione, tornando al passo di calcolo per il prossimo istante temporale (come descritto nei passaggi precedenti), e ripetere il ciclo fino a quando non saranno stati esaminati tutti i campioni pianificati.

Blocco 10. Il blocco è etichettato con "Genera i modelli lineari algebrici degli elementi dinamici (condensatori, induttori, etc)". In questo passaggio, il simulatore di circuiti compie l'azione di creare modelli lineari per rappresentare il comportamento degli elementi dinamici del circuito.

Nel contesto dei simulatori di circuiti, "elementi dinamici" si riferisce a quei componenti il cui comportamento cambia nel tempo, tipicamente in ri-

sposta a variazioni di tensione o corrente. I condensatori e gli induttori sono esempi classici di tali elementi dinamici: la tensione attraverso un condensatore non può cambiare istantaneamente, e lo stesso vale per la corrente attraverso un induttore. Le loro equazioni differenziali che descrivono questo comportamento dinamico devono essere trasformate in una forma lineare algebrica che può essere trattata all'interno del simulatore.

STOP. Indica la conclusione del processo di simulazione. Questo stadio viene raggiunto quando tutte le verifiche precedenti, inclusa quella sui campioni esaminati, indicano che gli obiettivi della simulazione sono stati soddisfatti. Significa che tutti i punti temporali specificati sono stati esaminati e che il comportamento del circuito è stato analizzato per l'intera durata di tempo prevista.

2.1.2 Analisi .DC

Partiamo distinguendo da prima due macro differenze.

Nel caso più "semplice", ovvero quello di circuiti lineari, i blocchi che riguardano questa parte sono solamente il 3 e 4. Il circuito diviene infatti completamente resistivo, perchè i rami che contengono i condensatori vengono trattati come circuiti aperti, mentre quelli con degli induttori vengono trattati come cortocircuiti.

Nel caso più "complesso", ovvero quello di circuiti non-lineari, il software linearizza i componenti non lineari nell'intorno del punto di lavoro in continua e si innesca un processo iterativo, stiamo parlando dei blocchi 1-6.

La formulazione della matrice nodale per circuiti puramente resistivi segue la notazione $Ax = b$, dove:

- A è la matrice dei coefficienti.

- x è il vettore delle incognite.
- b è il vettore dei termini noti.

La determinazione degli elementi di A , x , e b deriva dalle relazioni fisiche dei componenti del circuito, come la legge di Ohm per i resistori. Questo fornisce le basi per l'analisi matematica dei circuiti elettrici attraverso la simulazione.

In particolar modo la matrice A è rappresentata :

$$A = \begin{bmatrix} G_{1,1} & G_{1,2} & \cdots & G_{1,N-1} & a_{1,N} & \cdots & a_{1,N-1+N_{gV}} \\ G_{2,1} & G_{2,2} & \cdots & G_{2,N-1} & a_{2,N} & \cdots & a_{2,N-1+N_{gV}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{N-1,1} & G_{N-1,2} & \cdots & G_{N-1,N-1} & a_{N-1,N} & \cdots & a_{N-1,N-1+N_{gV}} \\ a_{N,1} & a_{N,2} & \cdots & a_{N,N-1} & a_{N,N} & \cdots & a_{N,N-1+N_{gV}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N-1+N_{gV},1} & a_{N-1+N_{gV},2} & \cdots & a_{N-1+N_{gV},N-1} & a_{N-1+N_{gV},N} & \cdots & a_{N-1+N_{gV},N-1+N_{gV}} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

dove:

$$G_{i,i} = \sum G_{al\ nodo\ i}^{connesse} ; \quad G_{i,j} = \sum_{i \neq j} G_{fra\ i\ e\ j}^{connesse} \quad (2.2)$$

$$a_{N-1+h,i} = \begin{cases} +1 & \text{se } V_{g,h}^+ = i \\ -1 & \text{se } V_{g,h}^- = i \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (2.3)$$

$$a_{i,N-1+h} = \begin{cases} +1 & \text{se } V_{g,h}^+ = i \\ -1 & \text{se } V_{g,h}^- = i \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (2.4)$$

con:

$$\begin{aligned} i, j &= 1, \dots, N \\ h &= 1, \dots, N_{gV} \end{aligned} \quad (2.5)$$

$+e -$ contrassegno ai terminali positivi o negativi

Per quanto riguarda x :

$$x = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_{N-1} \\ I_{x,1} \\ \vdots \\ I_{x,N_{gV}} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

dove:

- V_i = tensione del nodo i -simo (rispetto al nodo di riferimento)
- $I_{x,h}$ = corrente incognita associata all' h -simo generatore di tensione (in convenzione dell'utilizzatore)
- $i = 1, \dots, N$ e $h = 1, \dots, N_{gV}$

Invece per b :

$$b = \begin{bmatrix} I_{g,1} \\ I_{g,2} \\ \vdots \\ I_{g,N-1} \\ V_{g,1} \\ \vdots \\ V_{g,N_{gV}} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

dove:

- $I_{g,i} = \sum I_{g \text{ entranti nel nodo } i}$
- $V_{g,h}$ = tensione impressa dall'h-simo generatore di tensione.
- $i = 1, \dots, N$ e $h = 1, \dots, N_{gV}$

2.1.3 Componenti non lineari

Nella simulazione di circuiti non lineari, il software procede linearizzando i componenti non lineari nell'intorno del loro punto di lavoro in continua. Questo approccio è necessario perché, diversamente dai componenti lineari, quelli non lineari non possono essere descritti con semplici relazioni lineari come la legge di Ohm. Il processo iterativo si innesca per trovare una soluzione accurata, facendo uso dei blocchi da 1 a 6.

Per esemplificare, consideriamo il caso di un diodo, il cui comportamento è definito dalla relazione:

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V_d}{V_T}} - 1 \right) \quad (2.8)$$

dove I_d è la corrente attraverso il diodo, I_0 è la corrente di saturazione inversa, V_d è la tensione ai capi del diodo, e V_T è la tensione termica.

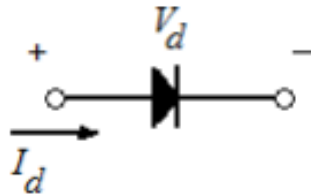


Figura 2.2: Caratteristica corrente-tensione (I-V) di un diodo.

La linearizzazione avviene considerando la tangente alla curva caratteristica del dispositivo nel punto di lavoro, che si traduce in:

$$G_{eq} = \frac{dI_d}{dV_d} = \frac{I_0}{V_T} e^{\frac{V_{do}}{V_T}} \quad (2.9)$$

dove G_{eq} è la conduttanza equivalente nel punto di lavoro V_{do} .

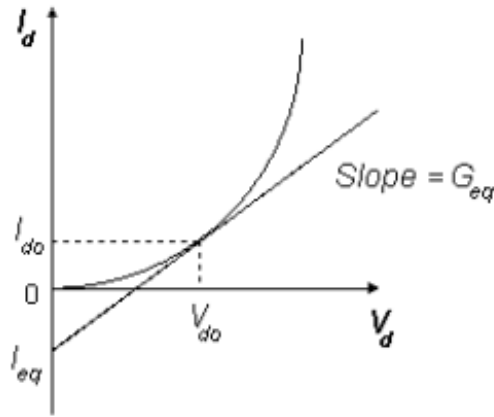


Figura 2.3: Linearizzazione di un componente non lineare e determinazione di G_{eq} .

Il circuito è quindi rianalizzato utilizzando i valori linearizzati, in un processo iterativo che utilizza l'algoritmo di Newton-Raphson. Questo procedimento continua finché la differenza tra i valori di tensione (e di corrente) consecutivi non è inferiore a una tolleranza prestabilita, indicando che la soluzione è stata raggiunta.

La sfida nella simulazione dei componenti non lineari sta nel garantire che il processo converga verso una soluzione valida. SPICE affronta queste sfide introducendo metodi avanzati per gestire la non linearità, come l'uso di un parametro minimo di conduttanza G_{MIN} , per prevenire problemi di convergenza dovuti a conduttanze molto basse nei punti di lavoro non ideali.

2.1.4 Analisi .TRANS

Per Analisi TRANS si intende l'analisi Transitoria del circuito, cioè la simulazione del comportamento temporale di un circuito elettronico.

Per quanto riguarda l'analisi dei circuiti **lineari** i blocchi 2 e 5 sono ignorati; dopo aver determinato il punto di lavoro iniziale, utilizzando le C.I. dei condensatori e degli induttori, i vari elementi con memoria sono trasformati nei modelli alle differenze finite.

Mentre per i circuiti **non-lineari** i blocchi 2 e 5 sono nuovamente inseriti, i componenti non lineari sono linearizzati come visto prima nell'intorno del punto di lavoro in continua (blocchi 1 - 6), e viene innescato il processo iterativo.

In questa analisi in particolare sono importanti i componenti con memoria, come i condensatori e gli induttori.

Per i componenti con memoria, SPICE utilizza modelli alle differenze finite per approssimare il comportamento nel tempo. Questo approccio consente di simulare come le variabili di stato dei componenti evolvono nel tempo sotto l'effetto di segnali variabili.

Per poter utilizzare i modelli alle differenze finite introduciamo il metodo di **Eulero in avanti (FE)** e il metodo di **Eulero all'indietro (BE)**.

Eulero in avanti (FE)

Il metodo di Eulero in avanti è un procedimento numerico di primo ordine per la risoluzione di equazioni differenziali ordinarie del tipo:

$$\frac{dx}{dt} = f(t, x) \quad (2.10)$$

dove x è la variabile dipendente e t è la variabile indipendente. Il metodo FE approssima la derivata di x rispetto a t usando la differenza finita avanti:

$$\frac{dx}{dt} \approx \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t} \quad (2.11)$$

Il passo successivo nel valore di x è quindi dato da:

$$x(t + \Delta t) = x(t) + \Delta t \cdot f(t, x(t)) \quad (2.12)$$

Eulero all'indietro (BE)

Il metodo di Eulero all'indietro è anch'esso un procedimento numerico di primo ordine, ma a differenza del FE, è un metodo implicito. In BE, la derivata di x rispetto a t è approssimata usando la differenza finita all'indietro:

$$\frac{dx}{dt} \approx \frac{x(t) - x(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (2.13)$$

Il valore di x al passo successivo è determinato risolvendo l'equazione:

$$x(t + \Delta t) = x(t) + \Delta t \cdot f(t + \Delta t, x(t + \Delta t)) \quad (2.14)$$

A causa della sua natura implicita, questo metodo richiede generalmente la soluzione di un'equazione algebrica a ogni passo temporale, il che può richiedere più calcoli rispetto al metodo FE. [8]

In particolare possiamo soffermarci sui **condensatori**, la cui equazione della corrente è:

$$i = C \frac{dv}{dt}. \quad (2.15)$$

Questa relazione esprime come la corrente che fluisce attraverso un condensatore sia proporzionale alla velocità di variazione della tensione attraverso di esso, dove C è la capacità del condensatore.

La formula della discretizzazione per il condensatore utilizza l'approccio delle differenze finite:

$$i(n + 1) = C \frac{v(n + 1) - v(n)}{\Delta T}. \quad (2.16)$$

Dove $v(n)$ e $v(n + 1)$ sono i valori della tensione ai tempi n e $n + 1$, rispettivamente, e ΔT è l'intervallo di tempo tra questi due istanti.

Combinando i due metodi di Eulero (FE + BE) è possibile dedurre un terzo metodo più raffinato, quello dei trapezi.

Metodo dei trapezi

Il metodo dei trapezi è un metodo più sofisticato per l'integrazione numerica, che è utilizzato per fornire una stima migliore della derivata:

$$i(n + 1) = C \frac{v(n + 1) - v(n)}{\Delta T} + C \left. \frac{dv}{dt} \right|_{media} \quad (2.17)$$

Questo metodo considera la media delle pendenze all'inizio e alla fine dell'intervallo di tempo, fornendo così una migliore approssimazione del comportamento reale del condensatore.

Queste equazioni sono fondamentali per l'analisi TRANS in SPICE, consentendo di calcolare la risposta temporale dei circuiti che includono componenti capacitive e induttive. Attraverso queste simulazioni, gli ingegneri possono prevedere come un circuito risponderà a varie forme d'onda di ingresso, valutare le prestazioni e identificare potenziali problemi prima di costruire un prototipo fisico.

2.1.5 Analisi .AC

L'analisi AC in SPICE procede attraverso due fasi principali:

1. **Fase 1:** Determinazione del punto di lavoro DC attraverso il ciclo non lineare (blocchi 1 - 6). Questa fase esclude condensatori, induttori e altri elementi con capacità di immagazzinare energia.

2. **Fase 2:** Costruzione della matrice dei nodi usando le ammettenze complesse dei componenti (lineari e/o linearizzati). I componenti non lineari sono sostituiti con modelli equivalenti a piccoli segnali basati sul punto di lavoro DC. Le alimentazioni esterne sono annullate, e le sorgenti di segnale impostate a valore unitario. Questi passaggi sono ripetuti per ogni frequenza richiesta.

2.2 PLECS

PLECS [7] lavora su due livelli, "modellazione" e "simulazione". La modellazione è il processo di estrazione della conoscenza da un sistema per rappresentarla formalmente. PLECS offre tre formalismi per la modellazione: equazioni (implementate come codice C), diagrammi a blocchi e modelli fisici, consentendo loro di coesistere nello stesso ambiente di modellazione. La simulazione, d'altra parte, si riferisce al processo di sperimentazione su un modello per prevedere come il sistema reale si comporterebbe nelle stesse condizioni. In PLECS, questo si traduce nel calcolo delle traiettorie degli stati e delle uscite del modello nel tempo, utilizzando un risolutore di equazioni differenziali ordinarie (ODE).

2.2.1 Modellazione di Sistemi Dinamici

I sistemi dinamici in PLECS sono rappresentati come scatole nere che scambiano informazioni (segnali di input e output) con l'ambiente esterno ma non energia. Possono avere variabili di stato interne, sia continue sia discrete, che immagazzinano informazioni sul passato del sistema e influenzano il suo comportamento attuale.

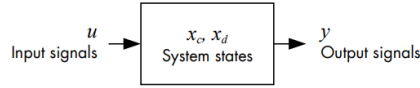


Figura 2.4: Sistemi dinamici in PLECS

Equazioni di Sistema

La descrizione di un sistema attraverso equazioni matematiche comprende:

- Una funzione di output che descrive le uscite del sistema in funzione del tempo, degli input e delle variabili di stato interne.

$$y = f_{\text{output}}(t, u, x_c, x_d) \quad (2.18)$$

- Una funzione di aggiornamento per i sistemi con stati discreti, che determina se e come cambiano in un dato momento.

$$x_d^{\text{next}} = f_{\text{update}}(t, u, x_c, x_d) \quad (2.19)$$

- Una funzione derivata per i sistemi con stati continui, che descrive le loro derivate rispetto al tempo.

$$\dot{x}_c = f_{\text{derivative}}(t, u, x_c, x_d) \quad (2.20)$$

Diagrammi a Blocchi

I diagrammi a blocchi sono un metodo di modellazione grafica comunemente utilizzato in ingegneria del controllo. Questa tecnica permette di rappresentare sistemi dinamici come una serie di blocchi interconnessi, dove ciascun blocco può essere considerato un sistema dinamico a sé. Questi blocchi sono collegati da linee direzionali che indicano il flusso di informazioni (segnali di input e output) tra di loro. L'ordine di valutazione delle equazioni dei blocchi individuali è determinato dalla direzione delle connessioni.

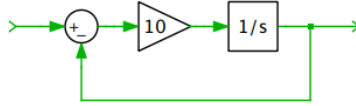


Figura 2.5: Diagramma a blocchi

Modelli Fisici

Mentre i diagrammi a blocchi sono adatti per modellare strutture di controllo in cui l'input e l'output di un blocco sono chiaramente definiti, questa distinzione può essere meno chiara o addirittura impossibile per i sistemi fisici. Ad esempio, un resistore elettrico lega le quantità di tensione e corrente secondo la legge di Ohm, ma può essere meno intuitivo stabilire se conduce corrente a causa di una tensione applicata o se produce una tensione perché attraversato da corrente. Questo dipende dal contesto, come il fatto che il resistore sia connesso in serie con un induttore o in parallelo con un condensatore, rendendo difficile la creazione di un singolo blocco che rappresenti un resistore elettrico in modo univoco.

Di conseguenza, i diagrammi a blocchi con connessioni direzionate generalmente non sono molto utili per modellare sistemi fisici. I sistemi fisici sono più facilmente rappresentabili tramite schemi in cui le connessioni tra i componenti non implicano un ordine computazionale. PLECS supporta modelli fisici nei domini elettrico, magnetico, meccanico e termico sotto forma di modelli a parametri concentrati.

2.2.2 Simulazione dei circuiti dinamici

La simulazione si divide in due fasi: inizializzazione e esecuzione.

Equazioni del Modello Fisico

PLECS imposta le equazioni del sistema per il modello fisico in base, ad esempio, alle leggi di Kirchhoff sulla corrente e sulla tensione. Se il modello fisico contiene solo elementi lineari ideali e/o di commutazione, può essere descritto da un insieme di equazioni di stato lineari a tratti:

$$\dot{x} = A_{\sigma}x + B_{\sigma}u \quad (2.21)$$

$$y = C_{\sigma}x + D_{\sigma}u \quad (2.22)$$

Dove il pedice σ indica che ogni cambio di stato di un elemento di commutazione porta a un nuovo insieme di matrici di stato.

Di seguito con un'immagine riassumo quanto detto ora.

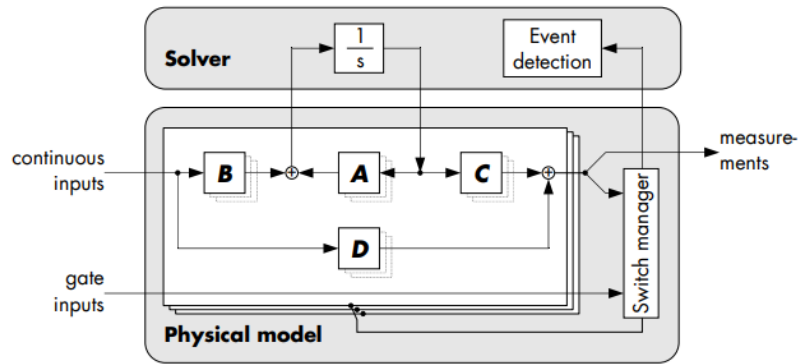


Figura 2.6: Modello fisico

Implementazione dello spazio di stato commutato

Il sottosistema fisico accetta segnali di ingresso esterni per fonti controllabili e per elementi di commutazione, e fornisce un segnale di uscita che contiene i valori delle misurazioni fisiche. Durante la simulazione, vengono

calcolate le derivate delle variabili di stato fisico e consegnate al risolutore, che a sua volta calcola i valori momentanei di queste variabili di stato.

Lo Switch Manager monitora i segnali dei gate e le misurazioni interne e decide se è necessaria un'azione di commutazione. Lo Switch Manager fornisce inoltre segnali ausiliari – cosiddetti segnali di attraversamento zero – al risolutore per la corretta localizzazione degli istanti esatti in cui dovrebbe verificarsi una commutazione.

Un diagramma di flusso dello Switch Manager è mostrato nella figura sottostante. Ad ogni passo della simulazione, dopo che sono state calcolate le misurazioni fisiche, lo Switch Manager valuta le condizioni di commutazione di tutti gli interruttori nel modello fisico. Se è necessaria un'azione di commutazione, inizia il calcolo di un nuovo insieme di matrici dello spazio di stato o recupera un insieme precedentemente calcolato da una cache. Successivamente, ricalcola le misurazioni fisiche con le nuove matrici dello spazio di stato per verificare se sono richieste ulteriori azioni di commutazione da dispositivi commutati naturalmente. Questo processo viene ripetuto fino a quando tutti gli interruttori non hanno raggiunto una posizione stabile. Se un insieme di stati degli interruttori σ viene incontrato ripetutamente in questo processo, PLECS non è in grado di determinare condizioni stabili e interrompe la simulazione.

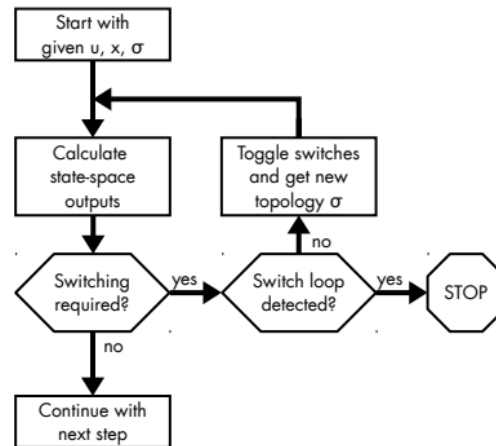


Figura 2.7: Diagramma di flusso dello Switch Manager

2.2.3 Esecuzione del Modello

L'esecuzione di un modello in PLECS avviene in diversi passaggi che sono riportati nella figura 2.8.

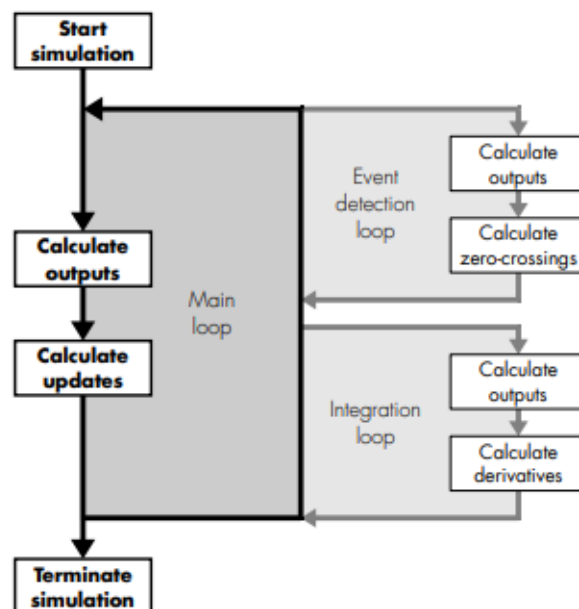


Figura 2.8: Esecuzione di un modello

Ciclo Principale

Il ciclo principale della simulazione, chiamato anche passo temporale maggiore, consiste in due azioni:

- Le funzioni di output di tutti i blocchi vengono valutate nell'ordine di esecuzione determinato durante l'ordinamento dei blocchi.
- Le funzioni di aggiornamento dei blocchi con variabili di stato discrete vengono eseguite per calcolare i valori delle variabili di stato discrete per il prossimo passo della simulazione.

A seconda del modello e delle impostazioni del risolutore, il risolutore può entrare in uno o entrambi i cicli minori successivi.

Ciclo di Integrazione

Se un modello ha variabili di stato continue, spetta al risolutore integrare numericamente le derivate temporali delle variabili di stato (fornite dal modello) al fine di calcolare i valori momentanei delle variabili di stato.

A seconda dell'algoritmo del risolutore, un passo di integrazione viene eseguito in più fasi – chiamate anche passi temporali minori – per aumentare l'accuratezza dell'integrazione numerica. In ogni fase, il risolutore calcola le derivate in un diverso momento intermedio. Poiché la funzione derivata di un blocco può dipendere dagli ingressi del blocco – cioè dagli output di altri blocchi – il risolutore deve prima eseguire tutte le funzioni di output per quel particolare momento.

Una volta completato un passo di integrazione per la dimensione del passo corrente, un risolutore a passo variabile verifica se l'errore di integrazione locale rimane entro la tolleranza specificata. In caso contrario, il passo di

integrazione corrente viene scartato e viene avviata una nuova integrazione con una dimensione del passo ridotta.

Ciclo di Rilevamento degli Eventi

Se un modello contiene discontinuità, ovvero istanti in cui il comportamento del modello cambia bruscamente, può registrare funzioni ausiliarie di evento per aiutare un risolutore a passo variabile a localizzare questi istanti. Le funzioni di evento sono funzioni di blocco e sono specificate implicitamente come funzioni di attraversamento zero in base al tempo corrente e agli ingressi e stati interni del blocco.

Ad esempio, se un modello fisico contiene un diodo, registrerà due funzioni di evento $f_{\text{accensione}} = v_D$ e $f_{\text{spegnimento}} = i_D$ in base alla tensione e alla corrente del diodo, così che il risolutore possa localizzare gli istanti esatti in cui il diodo dovrebbe accendersi e spegnersi.

Se una o più funzioni di evento cambiano segno durante il passo di simulazione corrente, il risolutore esegue una ricerca per bisezione per localizzare il momento del primo attraversamento zero. Questa ricerca coinvolge la valutazione delle funzioni di evento in diversi momenti intermedi. Poiché la funzione di evento di un blocco – come la funzione derivata – può dipendere dagli ingressi del blocco, il risolutore deve prima eseguire tutte le funzioni di output per un determinato momento. Anche questi passi temporali intermedi sono chiamati passi minori.

Una volta localizzato il primo evento, il risolutore ridurrà la dimensione del passo corrente in modo che il prossimo passo temporale maggiore sia preso subito dopo l'evento.

2.2.4 Simulazione a Passo Fisso

Come indicato nei paragrafi precedenti, alcuni aspetti importanti dei cicli di simulazione minore richiedono un risolutore a passo variabile che può cambiare la sua dimensione del passo durante una simulazione. L'uso di un risolutore con una dimensione del passo fisso ha due implicazioni serie.

Errore di Integrazione : Un risolutore a passo fisso non ha alcun controllo sull'errore di integrazione. L'errore di integrazione è una funzione delle costanti di tempo del modello, della dimensione del passo e del metodo di integrazione. Il primo parametro è ovviamente dato dal modello, ma il secondo e, eventualmente, il terzo parametro devono essere forniti dall'utente. Una strategia per determinare una dimensione del passo appropriata è eseguire iterativamente simulazioni e ridurre la dimensione del passo fino a quando i risultati della simulazione si stabilizzano.

Gestione degli Eventi : Le discontinuità in un modello fisico – come l'accensione o lo spegnimento di un diodo o la transizione dall'attrito statico a quello dinamico – tipicamente non coincidono con un passo di simulazione fisso. Posticipare tali eventi non campionati fino al passo di simulazione fisso seguente produrrà jitter e può portare a errori di runtime successivi.

2.2.5 Discretizzazione del Modello Fisico

Per mitigare i problemi dovuti agli eventi non campionati, PLECS trasforma il modello fisico in un modello a spazio di stati discreto quando viene simulato con un risolutore a passo fisso. Le equazioni a spazio di stati continui dei domini elettrico e magnetico sono discretizzate e sostituite con la seguente regola di aggiornamento:

$$x_n = A_d x_{n-1} + B_{d1} u_{n-1} + B_{d2} u_n \quad (2.23)$$

$$(2.24)$$

Di default, viene applicato un hold di primo ordine ai segnali di ingresso, ovvero si assume che gli ingressi cambino linearmente da u_{n-1} al passo precedente a u_n nel passo corrente. Di conseguenza, gli ingressi del modello elettromagnetico ora hanno un passaggio diretto perché i loro valori correnti devono essere noti prima che possano essere calcolati gli stati attuali del modello e l'uscita del modello. Ciò risulterà in un loop algebrico se il valore di una sorgente di tensione o corrente controllata dipende da una misurazione nel modello elettromagnetico.

Per evitare questo problema, la Sorgente di Corrente Controllata e la Sorgente di Tensione Controllata possono essere configurate per applicare un hold di ordine zero al segnale di ingresso quando il modello è discretizzato. In questo caso, è necessario solo il valore di ingresso dal passo di simulazione precedente per calcolare i valori degli stati attuali. Di default, le matrici di stato-spazio discrete A_d , B_{d1} e B_{d2} sono calcolate dalle matrici continue A e B utilizzando una formula di Runge-Kutta implicita completamente di quinto ordine a tre stadi (Radau IIA). In alternativa, può essere scelta la trasformazione bilineare nota come metodo di Tustin. È solo accurato al secondo ordine e presenta caratteristiche di smorzamento scarse per costanti di tempo inferiori alla dimensione del passo di discretizzazione, ma è più economico da calcolare perché $B_{d1} = B_{d2}$. Pertanto, può essere utile per simulazioni in tempo reale dove il tempo di calcolo è essenziale. Il metodo di discretizzazione può essere scelto nel dialogo dei Parametri di Simulazione.

Interpolazione degli Eventi di Commutazione Non Campionati

Con il modello fisico discretizzato in questo modo, gli eventi di commutazione non campionati possono essere gestiti in modo efficiente utilizzando l'algoritmo seguente:

1. Verifica se il risolutore ha superato un evento di commutazione non campionato nell'ultimo passo di simulazione.
2. In caso affermativo, determina il momento dell'evento e calcola lo stato del modello subito dopo l'evento utilizzando l'interpolazione lineare e gestisci l'evento, ad esempio, invertendo uno o più interruttori.
3. Esegui un passo completo in avanti.
4. Interpola linearmente gli stati del modello al tempo di simulazione attuale.

Questo algoritmo è illustrato usando l'esempio di un raddrizzatore a semionda. I due grafici mostrano la commutazione della corrente continua da diodo D3 (mostrato in grigio) a diodo D1 (mostrato in nero). Le linee continue mostrano i risultati da una simulazione con un risolutore a passo variabile; i punti grandi segnano i passi della simulazione a passo fisso e i punti piccoli segnano i passi di interpolazione interna. La commutazione inizia quando la tensione ai capi di D1 diventa positiva. Il risolutore a passo fisso procede inizialmente ben oltre il punto di attraversamento dello zero della tensione (1). PLECS poi ritorna internamente al punto di attraversamento dello zero (2) e attiva D1. Con il nuovo insieme di equazioni dello spazio di stato, esegue internamente un passo completo in avanti (3) e poi interpola indietro al tempo di simulazione effettivo (4). Successivamente, il risolutore procede oltre il punto di attraversamento dello zero della corrente attraverso

D3 (1). Ancora una volta, PLECS ritorna internamente al punto di attraversamento dello zero (2) e disattiva D3. Con il nuovo insieme di equazioni dello spazio di stato, esegue internamente un passo completo in avanti (3) e poi interpola indietro al tempo di simulazione effettivo (4).

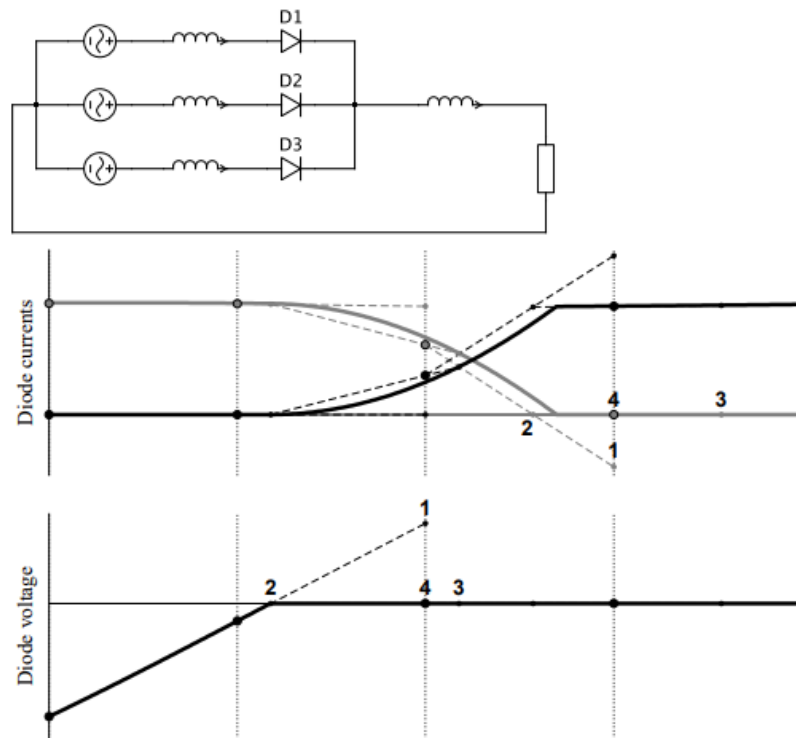


Figura 2.9:

L'interpolazione degli eventi di commutazione non campionati

Si noti che senza questo schema di interpolazione, D3 sarebbe stato disattivato al punto (1). Ciò avrebbe causato una discontinuità della corrente attraverso l'induttore nella fase 3. Un tale comportamento non fisico può portare a gravi errori di simulazione e dovrebbe quindi essere evitato.

Capitolo 3

Applicazioni di simulatori analogici simbolici

Introduzione

L'analisi simbolica dei circuiti elettronici gioca un ruolo cruciale nella verifica e nell'ottimizzazione dei design prima della realizzazione fisica. Questa parte si concentra su SAPWIN, un esempio di simulatore simbolico sviluppato dall'Università di Firenze, che offre capacità uniche per l'analisi circuitale.

L'analisi simbolica, a differenza dell'analisi numerica, mantiene le variabili dei circuiti in forma simbolica, permettendo una comprensione più profonda delle relazioni funzionali tra i vari componenti del circuito.

Storia e Sviluppo

L'evoluzione dei simulatori simbolici per l'analisi circuitale ha avuto inizio negli anni '60, segnata dal tentativo di automatizzare l'analisi dei circuiti mediante tecniche simboliche. Questa evoluzione è stata spinta dalla crescen-

te complessità dei circuiti e dalla necessità di disporre di strumenti analitici più efficaci.

Nell'era attuale, vi è una tendenza crescente a integrare su un unico chip sistemi completi per applicazioni specifiche, sia nella parte analogica che in quella digitale. Tuttavia, mentre l'automazione nella parte digitale è quasi completa, la progettazione analogica rimane in gran parte manuale e richiede una notevole esperienza. L'analisi simbolica, e strumenti come SAPWIN, gioca un ruolo fondamentale nel fornire ai progettisti gli strumenti per affrontare questa sfida, offrendo capacità uniche per l'analisi, la simulazione e l'ottimizzazione dei circuiti analogici.

3.1 SapWin

SAPWIN [5] è un software pensato anche per supportare la didattica, oltre che per l'analisi, la simulazione e l'ottimizzazione dei circuiti analogici, specialmente nel campo dell'ingegneria elettrica, offrendo una piattaforma per la simulazione simbolica e numerica di circuiti. Questo strumento combina la simulazione simbolica con quella numerica per fornire agli studenti e ai docenti un mezzo completo per analizzare circuiti lineari analogici.

3.1.1 Algoritmo Risolutivo

Per iniziare dobbiamo riportare il circuito che vogliamo analizzare su SapWin tramite la sua interfaccia, avendo riportato anche i dati dei vari componenti del circuito e scegliendo il tipo di analisi che vogliamo eseguire. SAPWIN, a questo punto, utilizza un metodo di enumerazione degli alberi su due grafi (Two Graph Tree Enumeration) applicabile principalmente a circuiti RCg_m e circuiti con componenti rappresentati da ammettenze e

transconduttanze(VCT). Vengono innanzi tutto costruiti due grafi, quello delle correnti G_I e quello delle tensioni G_v , i componenti bipolari generano la presenza, su entrambi i grafi, di un ramo tra gli stessi due nodi. La transconduttanza (g_m) produce, nel grafo G_v , un ramo tra i nodi di controllo e, nel grafo G_I , un ramo tra i nodi controllati. In entrambi i grafi il peso del ramo è il valore della transconduttanza.

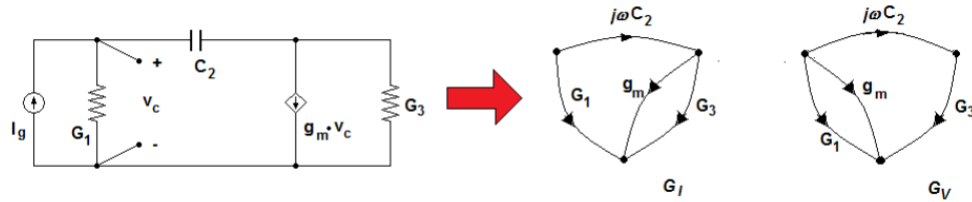


Figura 3.1: Esempio dei due grafi del circuito di sinistra

Per spiegare bene come funziona la risoluzione su SapWin dobbiamo dividere il calcolo di **Denominatore**, **Numeratore** e **Funzione di trasferimento**.

Denominatore

Una volta formati i grafi G_I e G_V e le rispettive matrici di incidenza per un circuito nel contesto dell'analisi simbolica con SAPWIN, l'analisi procede con i seguenti passaggi.

- Vengono identificati tutti gli alberi possibili [4] (cioè insiemi connessi di rami che includono tutti i nodi senza formare cicli) per entrambi i grafi. Questa operazione è cruciale perché gli alberi rappresentano possibili percorsi o configurazioni del circuito che contribuiscono al comportamento complessivo.

- Per ogni albero identificato nei grafi, si calcola il prodotto delle ammettenze dei rami che compongono l'albero. Questi prodotti rappresentano i termini che, sommati insieme, danno il determinante della matrice delle ammettenze.
- Viene calcolato il determinante della matrice delle ammettenze Y del circuito

Il Determinante della matrice delle ammettenze viene calcolato nel seguente modo:

$$\Delta = \sum_{\substack{\text{alberi comuni} \\ \text{ai due grafi}}} \epsilon_i \text{ (prodotto delle ammettenze sull'i-esimo albero comune)} \quad (3.1)$$

dove $\epsilon_i = \pm 1$ e $\epsilon = (\det m[A_i])(\det m[A_v])$, in questo caso $m[A_i]$ e $m[A_v]$ sono i minori delle matrici di incidenza relativi ai due alberi considerati.

Dato un grafo orientato costituito da N nodi e R rami, la matrice di incidenza A è una matrice $(N-1) \times R$ il cui generico elemento a_{ij} è dato da:

$$a_{ij} = \begin{cases} +1 & \text{se il ramo } j \text{ esce dal nodo } i \\ -1 & \text{se il ramo } j \text{ entra nel nodo } i \\ 0 & \text{il ramo } j \text{ non interessa il nodo } i \end{cases} \quad (3.2)$$

La figura 3.2 rappresenta l'utilizzo di questa formula. Se prendiamo come esempio la seconda riga ci focalizziamo sul nodo 2, da questo escono i rami 3 e 4 e quindi mettiamo un 1 nella matrice in corrispondenza della posizione 2,3 e 2,4, il ramo 1 non è collegato e quindi nella matrice ci va uno 0 in posizione 2,1, infine il ramo 2 entra nel nodo e quindi -1 in posizione 2,2.

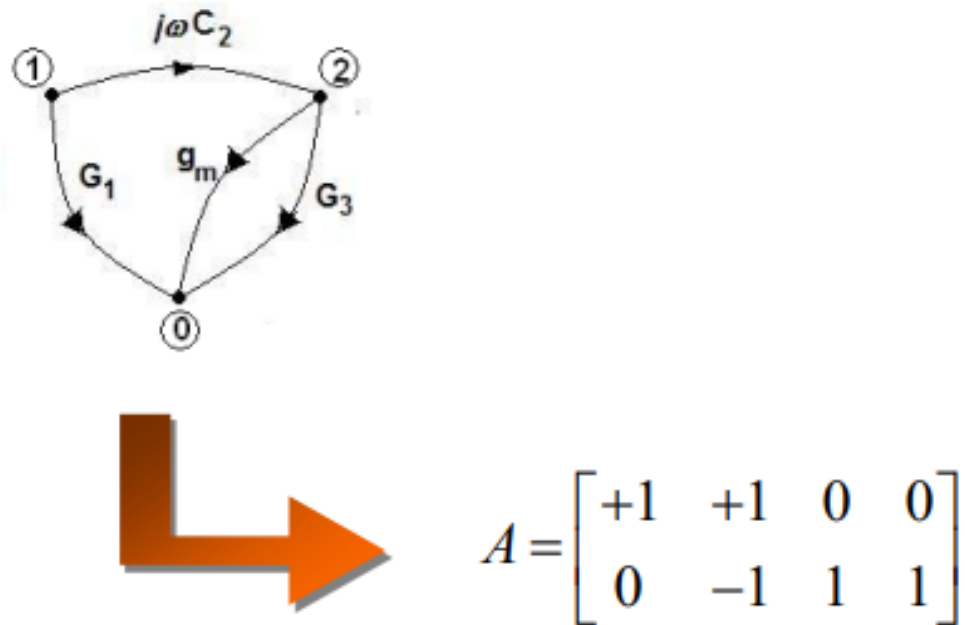


Figura 3.2: Analisi del nostro esempio

Numeratore

Qui vengono presentati i passaggi per il calcolo del numeratore della formula finale:

- Per il calcolo del numeratore della funzione di trasferimento, si considera un co-albero, ossia l'insieme di rami che non appartengono all'albero ma che, se aggiunti ad esso, formano cicli. Questi cicli sono legati alla variabile di uscita del circuito.
- Si manipola il grafo originale in modo da riflettere l'effetto dell'ingresso e dell'uscita del circuito. Questo può comportare la modifica dei pesi o l'aggiunta/rimozione di rami nel grafo, a seconda della configurazione specifica dell'ingresso e dell'uscita.

- Similmente al calcolo del denominatore, si calcolano i prodotti di ammettenza per gli alberi modificati che riflettono la configurazione di uscita. Questi prodotti contribuiscono al numeratore della funzione di trasferimento. Una volta calcolati tutti i prodotti, il numeratore non è altro che la somma di questi.

Per calcolare quindi il numeratore dobbiamo posizionare un "eccitazione" nel circuito come per la figura 3.3.

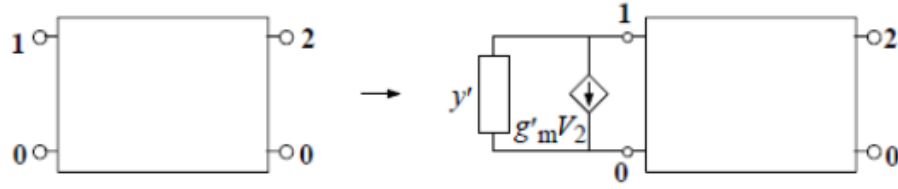


Figura 3.3: Aggiunta dell'eccitazione nel circuito

Nella figura 3.3 posizioniamo l'eccitazione tra i nodi 1 e 0, l'uscita è quella tra i nodi 2 e 0.

Il determinante della matrice delle ammettenze del circuito modificato è:

$$\Delta' = \Delta + y'\Delta_{11} + g'_m\Delta_{12} \quad (3.3)$$

Da questa le **funzioni di rete** del circuito risultano:

$$Z_{in} = \frac{V_1}{I_1} = \frac{\Delta_{11}}{\Delta} \quad (3.4)$$

$$\frac{V_o}{I_{in}} = \frac{V_2}{I_1} = \frac{\Delta_{12}}{\Delta} \quad (3.5)$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{\Delta_{12}}{\Delta_{11}} \quad (3.6)$$

con:

$\Delta = \det.$ matrice ammettenze ai nodi

$\Delta_{ij} = ij$ -esimo cofattore

Funzione di trasferimento

La funzione di trasferimento $H(s)$ del circuito si ottiene dividendo il numeratore, che rappresenta la risposta del circuito relativa all'uscita, per il denominatore, che rappresenta le condizioni globali del circuito (determinante della matrice delle ammettenze).

$$H(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (3.7)$$

Infine, la funzione di trasferimento risultante può essere ulteriormente semplificata o analizzata per determinare le proprietà del circuito, come la stabilità, la banda passante, e i punti di guadagno. [3]

Capitolo 4

Confronto ragionato tra simulatori simbolici e numerici

Per confrontare i simulatori andremo ad analizzare uno stesso circuito e noteremo le differenze di lavoro e di risultato.

4.1 Introduzione ai Filtri Elettronici

I filtri elettronici giocano un ruolo cruciale nella progettazione dei circuiti elettronici moderni, avendo la capacità di selezionare o eliminare specifiche frequenze da un segnale. Sono classificati in filtri attivi e passivi. Mentre i **filtri passivi** sono costituiti esclusivamente da componenti passivi come resistenze, induttori e condensatori, i **filtri attivi** includono amplificatori operazionali, offrendo così la possibilità di amplificare il segnale di ingresso.

Dal punto di vista elettrotecnico, un filtro può essere considerato come un quadripolo con una porta d'ingresso e una d'uscita. Matematicamente, la descrizione del filtro avviene nel dominio del tempo attraverso la sua risposta

impulsiva, che determina il segnale in uscita per un dato segnale in ingresso mediante l'operazione di convoluzione.

4.1.1 Gli Amplificatori Operazionali nei Filtri Attivi

Gli amplificatori operazionali, comunemente noti come op-amp, sono dispositivi elettronici versatili e fondamentali nella realizzazione di filtri attivi. Caratterizzati da un'alta impedenza di ingresso e una bassa impedenza di uscita, gli op-amp consentono l'amplificazione di segnali con una vasta gamma di configurazioni. [2]

Caratteristiche Principali degli Op-Amp:

Gli op-amp (figura 4.1) presentano diverse caratteristiche ideali, tra cui:

- **Guadagno in Tensione Infinito:** La differenza di potenziale tra i due ingressi viene amplificata infinitamente, rendendo l'op-amp estremamente sensibile alle variazioni di tensione.
- **Impedenza di Ingresso Infinita:** Non vi è flusso di corrente negli ingressi, il che minimizza il carico sul circuito precedente.
- **Impedenza di Uscita Nulla:** Permette al dispositivo di fornire corrente senza perdere tensione tra l'uscita dell'op-amp e il carico.
- **Banda Passante Infinita:** L'op-amp può amplificare segnali di qualsiasi frequenza senza distorsione.

Per i simulatori analogici **simbolici** rappresentiamo facilmente gli op-amp ideali. Per i simulatori analogici **numerici** abbiamo anche la distinzione tra op-amp ideali e op-amp reali. Gli op-amp reali, a differenza delle caratteristiche di quelli ideali che abbiamo descritto sopra, sono limitati. Infatti

guadagno e impedenza di ingresso sono finite, impedenza di uscita non è nulla e la banda passante è limitata.

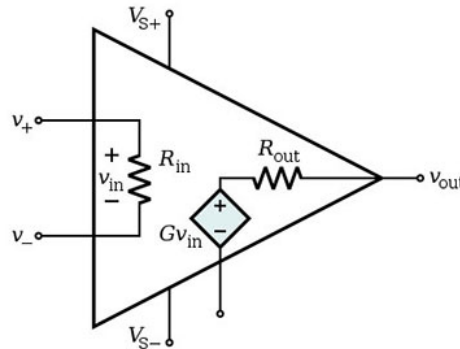


Figura 4.1: Rappresentazione di un amplificatore operazionale [11]

Ruolo negli Filtri Attivi

Negli filtri attivi, gli op-amp svolgono ruoli cruciali come:

- **Integratori e Derivatori:** Manipolano la fase e l'ampiezza del segnale in funzione della frequenza, essenziali nei filtri passa-basso e passa-alto.
- **Sommatore:** Combinano più segnali in ingresso, utili nei filtri passa-banda per sommare le componenti filtrate.
- **Buffer:** Separano i circuiti per prevenire l'interazione tra stadi del filtro, mantenendo la stabilità e l'integrità del segnale.

La flessibilità e l'efficacia degli op-amp nei filtri attivi li rendono indispensabili nella progettazione di sistemi elettronici, permettendo di ottenere risposte in frequenza precise e configurabili secondo specifiche esigenze.

Per capire meglio il circuito che poi andremo ad analizzare parliamo anche dei **filtri attivi del secondo ordine**.

Questi si basano sull'utilizzo di amplificatori operazionali ed il cui polinomio al denominatore ha grado 2. In particolare i filtri attivi del secondo ordine hanno come caratteristiche una migliore sensibilità rispetto a filtri passivi o a filtri di ordine inferiore, essi sono rappresentati attraverso la seguente funzione di trasferimento:

$$W(s) = K \frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{s^2 + \frac{w_0}{Q} s + w_0^2} \quad (4.1)$$

Dove K è il guadagno di banda passante del filtro, Q il fattore di qualità e w_0 è la pulsazione naturale del filtro. Si nota che i poli della funzione di trasferimento assumono i seguenti valori:

$$p_{1,2} = -\frac{w_0}{2Q} \pm 2w_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}} \quad (4.2)$$

4.1.2 Classificazione dei Filtri

I filtri possono essere suddivisi in base alla loro risposta in frequenza [6], distinguendoli in quattro categorie principali:

- **Filtri Passa-Basso (LP):** Questi filtri permettono il passaggio delle frequenze inferiori a una certa frequenza di taglio, attenuando le frequenze superiori.

$$H_{LP}(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (4.3)$$

- **Filtri Passa-Alto (HP):** Al contrario dei filtri passa-basso, i filtri passa-alto attenuano le frequenze inferiori a una certa frequenza di taglio, permettendo il passaggio di quelle superiori.

$$H_{HP}(s) = \frac{s}{s + \omega_c} \quad (4.4)$$

- **Filtri Passa-Banda (BP):** I filtri passa-banda permettono il passaggio di un intervallo di frequenze, attenuando quelle al di fuori di questo intervallo.

$$H_{BP}(s) = \frac{s \cdot \omega_0}{(s + \omega_{c1})(s + \omega_{c2})} \quad (4.5)$$

- **Filtri Elimina-Banda (BS o Notch):** Questi filtri attenuano un intervallo specifico di frequenze, permettendo il passaggio di tutte le altre.

$$H_{BS}(s) = \frac{(s^2 + \omega_0^2)}{(s + \omega_{c1})(s + \omega_{c2})} \quad (4.6)$$

dove:

$\omega_c = 2\pi f_c$ che è la frequenza di cutoff in rad/s, in particolare f_{c1} è la frequenza di taglio più bassa e f_{c2} è la frequenza di taglio più alta.

La sostanziale differenza tra i simulatori analogici **simbolici** e simulatori analogici **numerici** sarà:

- la precisione dei risultati, questa sarà maggiore in quelli simbolici
- la possibilità di tenere in considerazione la differenza tra op-amp ideali e reali, presente unicamente in quelli numerici

4.2 Filtro Tow-Thomas

Il circuito che andremo ad analizzare nello specifico è il filtro di Tow-Thomas, detto anche filtro risonante. [9]

Il filtro Tow-Thomas è un tipo di filtro attivo del secondo ordine che viene utilizzato per implementare varie funzioni di filtraggio, come filtri passa-basso, passa-banda e passa-alto. È stato introdotto negli anni '70 da Barrie Gilbert, L. Tow e H. Thomas come un miglioramento dei filtri attivi precedenti, offrendo una maggiore stabilità e flessibilità. Il filtro Tow-Thomas si

basa sull'utilizzo di amplificatori operazionali (op-amp), resistori e condensatori, ed è noto per la sua capacità di mantenere una buona linearità di fase all'interno della banda passante.

Il circuito Tow-Thomas utilizza tre amplificatori operazionali: due sono impiegati in configurazione integratore, mentre il terzo viene utilizzato per fornire una retroazione negativa e stabilizzare il circuito. Questa configurazione permette al filtro di avere una risposta in frequenza controllata e di implementare facilmente diverse funzioni di trasferimento modificando i valori dei componenti passivi (resistori e condensatori).

Un vantaggio significativo del filtro Tow-Thomas è la sua capacità di realizzare filtri passa-banda con fattori di qualità (Q) elevati senza la necessità di componenti con valori estremi. Ciò lo rende particolarmente utile in applicazioni audio e di elaborazione del segnale, dove è necessaria una precisa manipolazione delle frequenze.

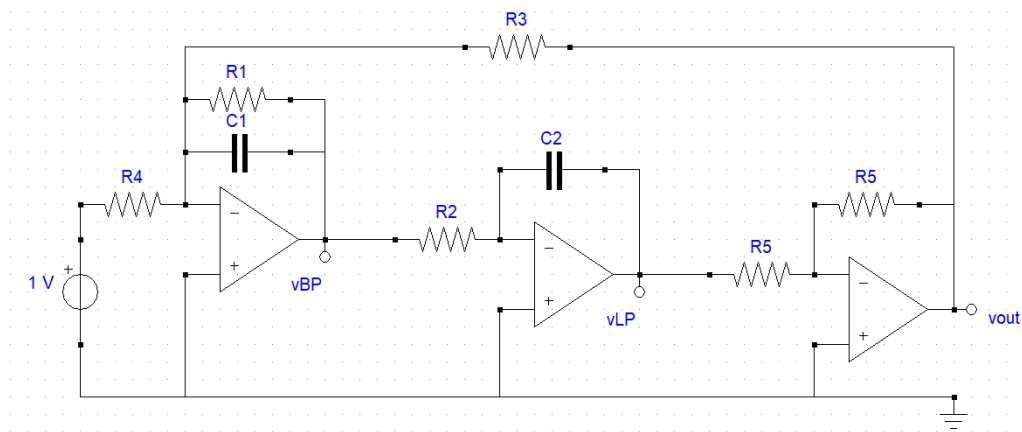


Figura 4.2: Filtro Tow-Thomas

La funzione di trasferimento di un filtro Tow-Thomas dipende dalla configurazione specifica che si utilizza (passa-basso, passa-banda, o passa-alto). Tuttavia, la configurazione più comune è quella che sfrutta appieno le poten-

zialità di questo circuito è il filtro passa-banda. La funzione di trasferimento per un filtro passa-banda Tow-Thomas può essere espressa come segue:

$$H(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{A_0 \frac{\omega_0}{Q} \omega}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} s + \omega_0^2} \quad (4.7)$$

Dove:

- $H(s)$ è la funzione di trasferimento del filtro,
- $V_{out}(s)$ e $V_{in}(s)$ sono, rispettivamente, le trasformate di Laplace del segnale di uscita e di ingresso,
- A_0 è il guadagno a frequenza zero (DC gain),
- ω_0 è la frequenza angolare di taglio (o frequenza naturale) del filtro, espressa in rad/s,
- Q è il fattore di qualità del filtro, che descrive la selettività o il picco di risposta del filtro vicino alla sua frequenza di risonanza,
- s è la variabile complessa della trasformata di Laplace, che rappresenta la frequenza complessa.

La variabile s è un numero complesso che rappresenta la frequenza del segnale. Viene espressa come:

$$s = \sigma + j\omega \quad (4.8)$$

dove:

- σ è la parte reale di s e rappresenta l'attenuazione esponenziale (o la crescita se positiva).
- j è l'unità immaginaria (equivalente a $\sqrt{-1}$).

- ω è la parte immaginaria di s e rappresenta la frequenza angolare del segnale in radianti al secondo.

Quando si analizza un circuito per frequenze specifiche, si considera il caso stazionario dove $\sigma = 0$ e s è puramente immaginario $s = j\omega$. Questo è tipicamente il caso per l'analisi dei circuiti in corrente alternata (AC) dove si è interessati a una particolare frequenza di funzionamento.

Quindi, nella maggior parte delle analisi dei filtri, sostituirai s con $j\omega$ per studiare la risposta in frequenza del filtro, dove $\omega = 2\pi f$, e f è la frequenza del segnale in hertz.

Mentre la nostra funzione di trasferimento $H(s)$ rappresenta un filtro passa-banda con una frequenza di risonanza (f_0) e un fattore di qualità (Q) che dipendono dai valori dei componenti come segue:

Frequenza di risonanza (o frequenza centrale):

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R1 \cdot C1 \cdot R2 \cdot C2}} \quad (4.9)$$

Fattore di qualità (Q):

$$Q = \frac{\sqrt{R1 \cdot C1 \cdot R2 \cdot C2}}{C2 \cdot (R3 + R4)} \quad (4.10)$$

Il fattore Q indica l'ampiezza del picco della risposta in frequenza alla frequenza di risonanza. Un Q più alto significa un picco più stretto e più pronunciato, mentre un Q più basso indica una banda passante più larga e un picco meno pronunciato.

Per altre configurazioni, come i filtri passa-alto o passa-basso, la funzione di trasferimento varierà a seconda di come sono collegati i componenti all'interno del circuito. Il filtro Tow-Thomas offre una flessibilità significativa in questo senso, consentendo la realizzazione di diverse funzioni di filtraggio semplicemente modificando il posizionamento e i valori dei resistori e dei condensatori.

Per il nostro esempio abbiamo utilizzato questo valori:

- $C1 = 1e^{-8}$
- $C2 = 1e^{-8}$
- $R1 = 318310$
- $R2, R3, R4, R5 = 15915$

Inoltre abbiamo inserito una tensione in ingresso pari ad 1 V, se guardiamo la figura 4.2 notiamo un generatore da 1 V, così facendo la V_{in} è pari a 1 e quindi il risultato della tensione di uscita dei vari software è pari alla funzione di trasferimento.

$$H(s) = V_{out} \quad (4.11)$$

4.3 PLECS

Cominciamo con l'analisi **numerica**, che come abbiamo introdotto partendo con **PLECS**. Chiaramente questa non sarà un numero, ma una rappresentazione tramite un grafico.

La rappresentazione su PLECS è quella dell'immagine 4.3, l'interfaccia è molto intuitiva e da molte possibilità di rappresentazione.

PLECS ci dà la possibilità tramite i voltimetri, e le risposte ad essi associate, che ho messo di avere un grafico delle tre uscite che ho inserito. La particolarità di questo software è la possibilità di inserire un generatore controllato che ha come ingresso quello che viene chiamato Perturbation e quindi rendere il nostro segnale variabile.

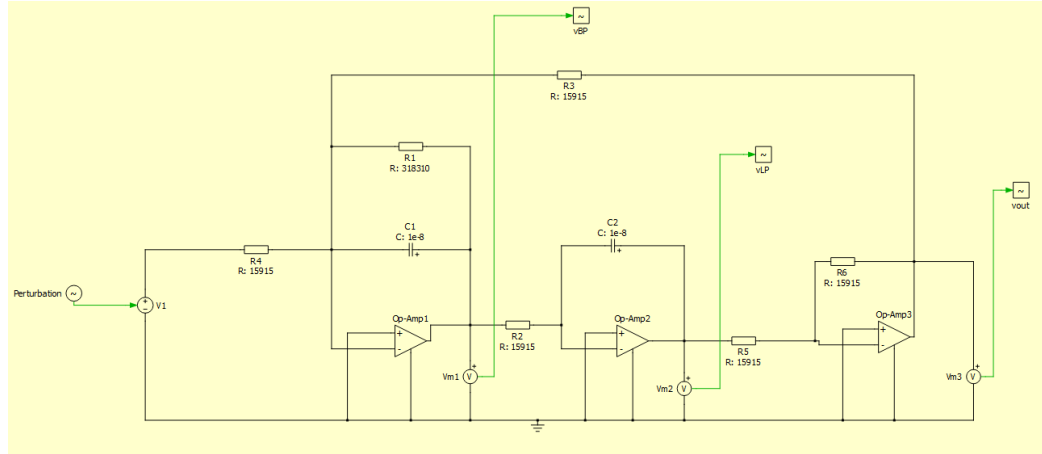


Figura 4.3: Filtro Tow-Thomas rappresentato in PLECS

La rappresentazione delle immagini 4.4 e 7.1 è detto diagramma Bode che mostra la risposta in frequenza di un filtro. Il diagramma Bode è composto da due parti: la parte superiore rappresenta la magnitudo (guadagno) del segnale in decibel (dB) rispetto alla frequenza, mentre la parte inferiore rappresenta la fase del segnale in gradi rispetto alla frequenza.

Per realizzare il grafico ho dato 5000 punti di campionamento e grazie a PLECS posso dare un colore alle varie rappresentazioni per poterle distinguere bene. Come è schematizzato nell'immagine, rappresentiamo le uscite vBP, vLP e vout, la particolarità in questo nostro caso è che l'uscita vout e vLP si sovrappongono e quindi nella 4.4 non vediamo la rappresentazione di vLP.

Il secondo diagramma 7.1 viene detto della Fase che viene usato per mostrare come la fase del segnale in uscita da un circuito varia al variare della frequenza del segnale in ingresso. Nel grafico, l'asse orizzontale (asse x) rappresenta la frequenza in hertz (Hz) su una scala logaritmica, che si estende da 10 Hz a 1 MHz ($1e+06$ Hz). L'asse verticale (asse y) rappresenta la fase in gradi.

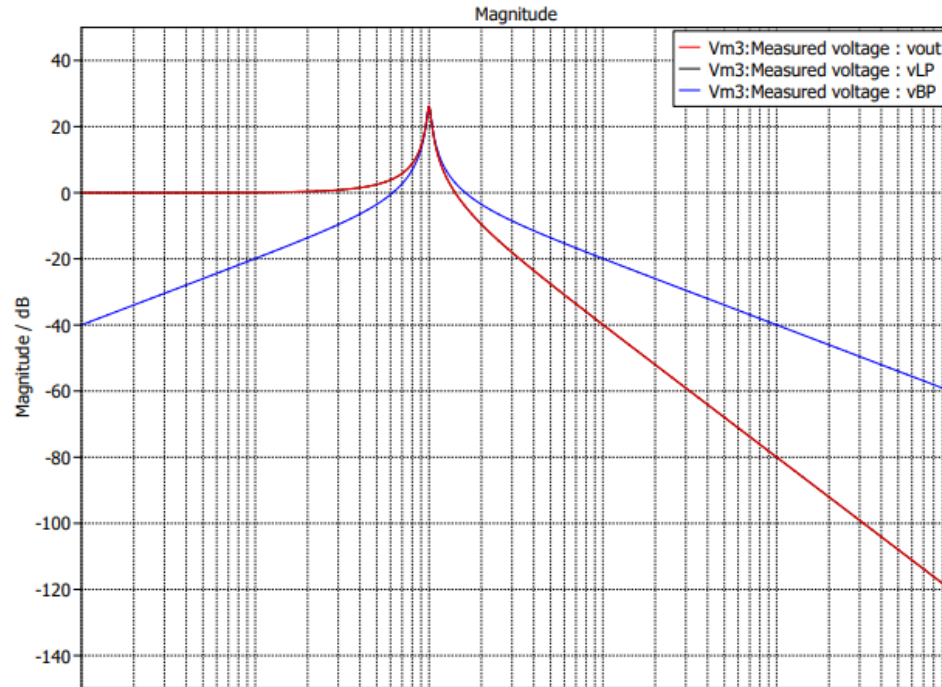


Figura 4.4: Diagramma di Bode del Guadagno

Ci sono tre curve nel grafico, ciascuna rappresentante la fase delle diverse uscite misurate (v_{out} , v_{LP} e v_{BP}) del filtro Tow-Thomas:

- La curva rossa rappresenta la fase dell'uscita " v_{out} " che è l'uscita principale del filtro.
- La curva blu rappresenta la fase dell'uscita " v_{LP} " che è l'uscita del filtro passa-basso.
- La curva nera rappresenta la fase dell'uscita " v_{BP} " che è l'uscita del filtro passa-banda.

La sovrapposizione delle curve o la vicinanza tra di loro indica quanto sono simili le caratteristiche di fase delle diverse uscite rispetto al cambiamento della frequenza.

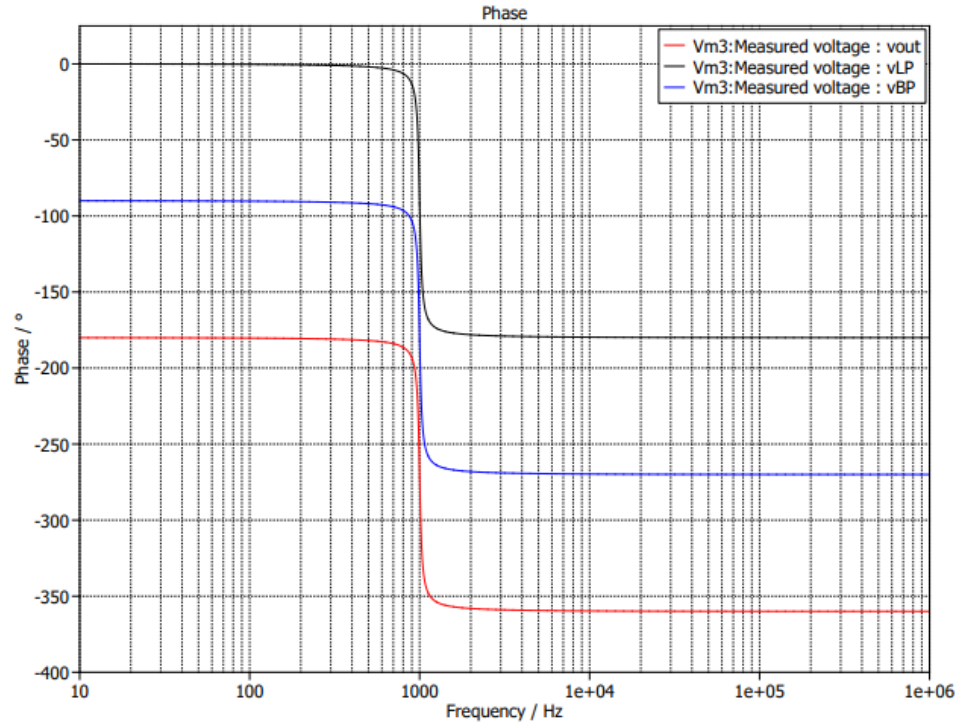


Figura 4.5: Diagramma di Bode della Fase

Analisi del risultato

Analizziamo le tre uscite:

- vLP è la tensione di uscita del filtro **passa-basso**
- vBP è la tensione di uscita del filtro **passa-banda**
- vout è la tensione di uscita generale del circuito

Quello che salta subito all'occhio è la sovrapposizione tra le linee di uscita di vLP e vout, questo sta a significare che per le frequenze in cui si verifica questa sovrapposizione, la risposta del filtro passa-basso e la risposta complessiva del circuito sono identiche. In altre parole, la tensione di uscita del circuito (vout) in quelle frequenze è determinata interamente dalla componente passa-basso del circuito. Questa sovrapposizione può essere dovuta

al fatto che la tensione v_{out} è prelevata direttamente dall'uscita del filtro passa-basso, o perché l'intero circuito si comporta come un filtro passa-basso in quelle frequenze.

4.4 LTSpice

L'altro simulatore numerico che abbiamo analizzato è LTSpice.

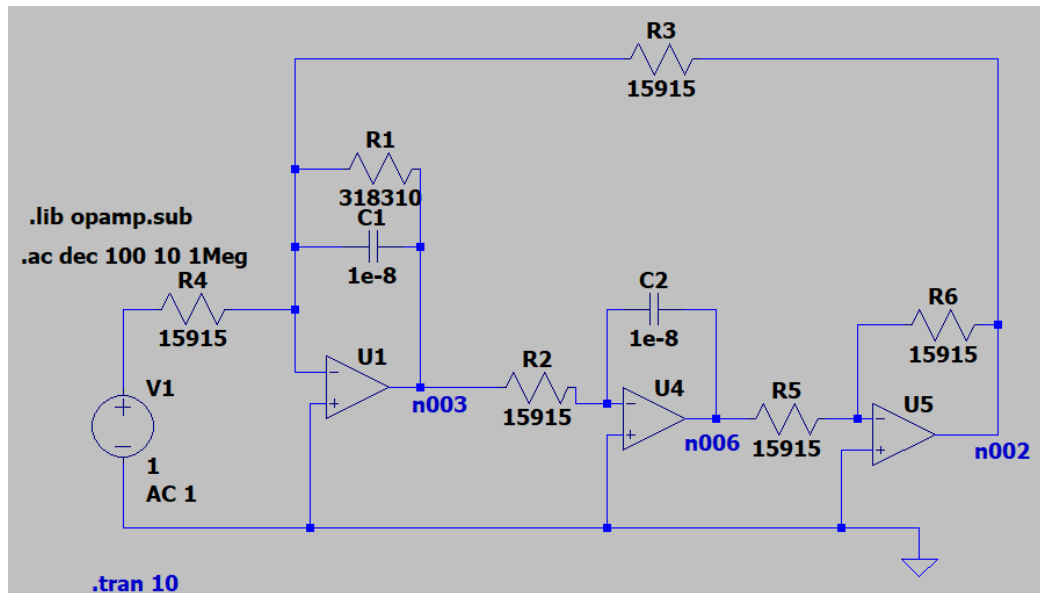


Figura 4.6: Circuito rappresentato su LTSpice

Qui di seguito nell'immagine 4.7 vi è la rappresentazione del diagramma di Bode sia della fase che del guadagno. Possiamo osservare che il diagramma è uguale a quello generato da PLECS, in particolare:

- La linea verde è la rappresentazione della tensione nel primo filtro, e quindi del filtro **passa-banda** corrispondente al nodo $n003$
- La linea in blu è la rappresentazione della tensione del secondo filtro **passa-basso** corrispondente al nodo $n006$, non viene rappresenta-

ta nella parte superiore perchè ha lo stesso andamento dell'uscita del circuito

- la linea rossa è la rappresentazione della tensione dell'uscita finale posizionata sul nodo $n002$, cioè del filtro più a destra

Come successo anche per PLECS, anche in questo caso abbiamo la sovrapposizione dell'uscita con il filtro passa-basso.

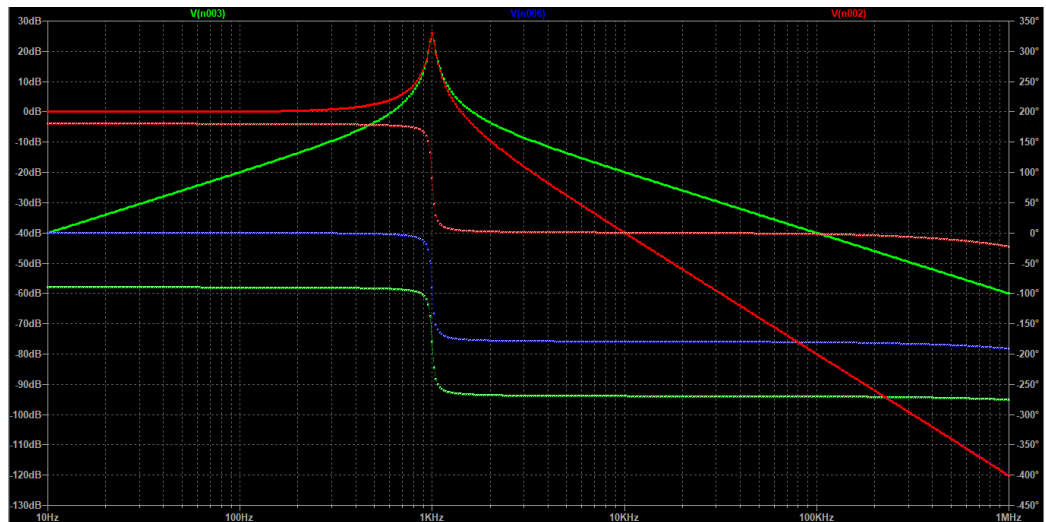


Figura 4.7: Diagramma di Bode di LTSpice

4.5 SapWin

Andiamo adesso a vedere il risultato dello stesso circuito su un simulatore analogico **simbolico**, di seguito l'immagine 4.8 che ci illustra l'implementazione grafica del filtro Tow-Thomas in SapWin.

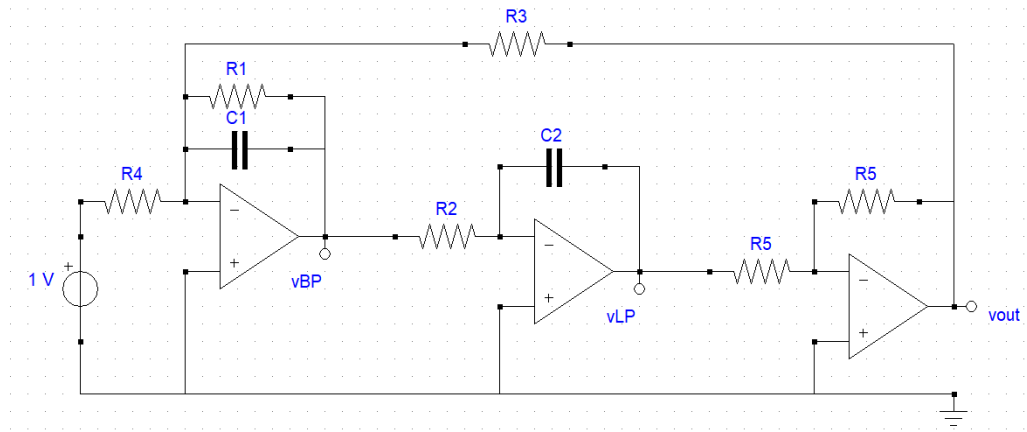


Figura 4.8: Filtro Tow-Thomas rappresentato in PLECS

Essendo un simulatore simbolico il risultato ci verrà consegnato con una relazione tra le varie componenti del filtro. Infatti i risultati nel dominio di Laplace delle uscite disegnate nel circuito sono i seguenti:

$$v_{\text{out}} = \frac{+(-R_1 R_3 R_5)}{+(R_1 R_4 R_5) + (C_2 R_2 R_3 R_4 R_5) s + (C_2 C_1 R_1 R_2 R_3 R_4 R_5) s^2} \quad (4.12)$$

$$v_{\text{BP}} = \frac{+(-C_2 R_1 R_2 R_3 R_5) s}{+(R_1 R_4 R_5) + (C_2 R_2 R_3 R_4 R_5) s + (C_2 C_1 R_1 R_2 R_3 R_4 R_5) s^2} \quad (4.13)$$

$$v_{\text{LP}} = \frac{+(R_1 R_3 R_5)}{+(R_1 R_4 R_5) + (C_2 R_2 R_3 R_4 R_5) s + (C_2 C_1 R_1 R_2 R_3 R_4 R_5) s^2} \quad (4.14)$$

Come abbiamo detto poco sopra $s = \sigma + j\omega$, nel nostro caso però $\sigma = 0$, è nullo e quindi rimane $j\omega$. Possiamo a questo punto sostituire s così da passare nel dominio della Frequenza.

$$v_{\text{out}} = \frac{+(-R_1 R_3 R_5)}{+(R_1 R_4 R_5) + (C_2 R_2 R_3 R_4 R_5) j\omega - (C_2 C_1 R_1 R_2 R_3 R_4 R_5) \omega^2} \quad (4.15)$$

$$v_{\text{BP}} = \frac{+(-C_2 R_1 R_2 R_3 R_5) j\omega}{+(R_1 R_4 R_5) + (C_2 R_2 R_3 R_4 R_5) j\omega - (C_2 C_1 R_1 R_2 R_3 R_4 R_5) \omega^2} \quad (4.16)$$

$$v_{\text{LP}} = \frac{+(R_1 R_3 R_5)}{+(R_1 R_4 R_5) + (C_2 R_2 R_3 R_4 R_5) j\omega - (C_2 C_1 R_1 R_2 R_3 R_4 R_5) \omega^2} \quad (4.17)$$

Come abbiamo detto a più riprese SapWin ammette anche una rappresentazione numerica che è quella delle figure 4.9 e 4.10, e possiamo vedere bene la corrispondenza con quanto abbiamo detto per LTspice e PLECS.

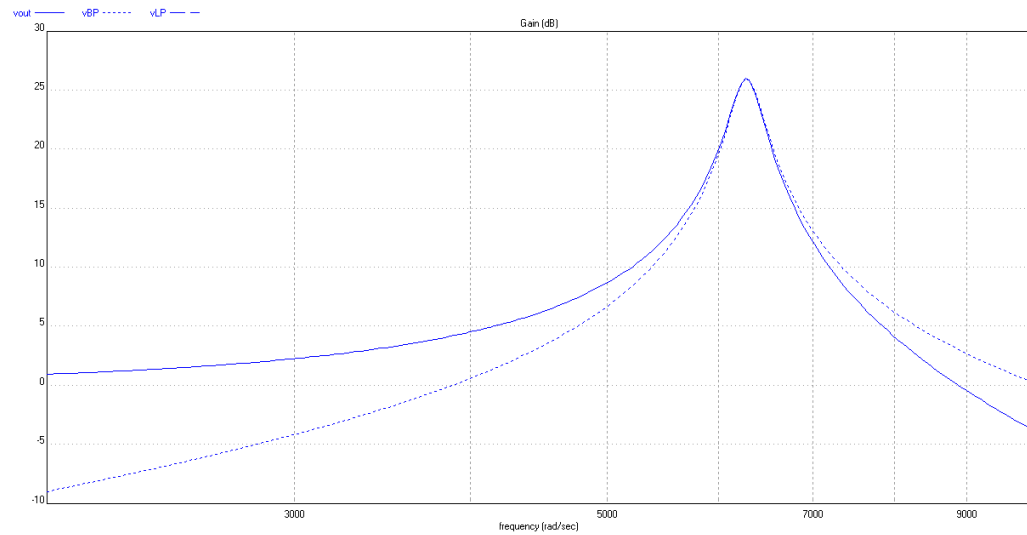


Figura 4.9: Diagramma del Gain per SapWin

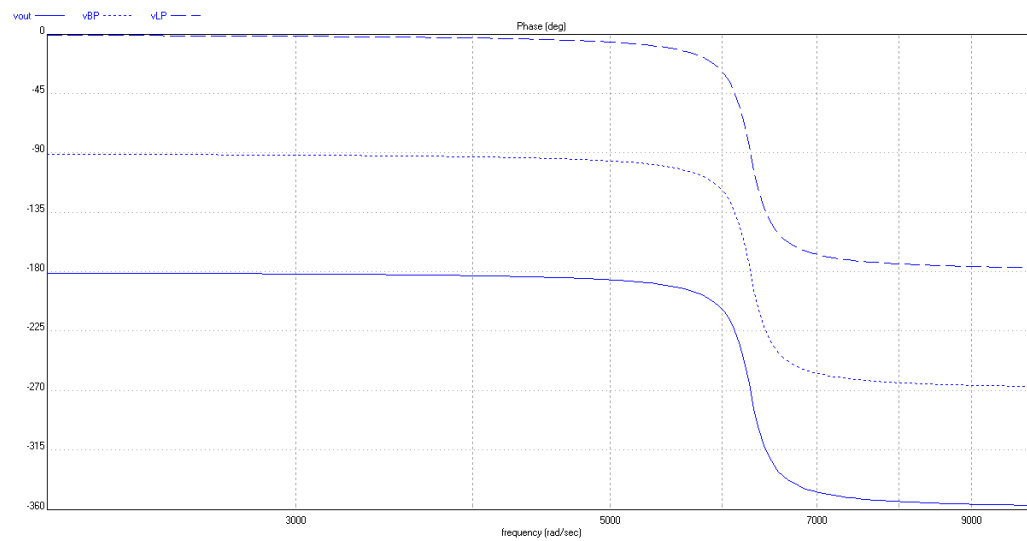


Figura 4.10: Diagramma della Fase per SapWin

Analizzandoli, possiamo dire con certezza che il risultato è uguale a quello degli altri due simulatori, in quanto rappresentiamo le stesse tensioni di uscita:

- **vBP**, che è scritta con la linea più tratteggiata

- **vLP**, che è la linea tratteggiata a tratti più lunghi
- **vout**, che è la linea continua

Capitolo 5

Sviluppi futuri

5.1 Sviluppi futuri

Nell'esplorare gli sviluppi futuri nel campo della simulazione di circuiti elettronici, è essenziale riconoscere l'impatto trasformativo che tecnologie emergenti e nuovi paradigmi computazionali stanno avendo. Tra questi, l'intelligenza artificiale e il machine learning, la simulazione basata su cloud e distribuita, il miglioramento dell'interfaccia utente e il supporto per nuove tecnologie rappresentano aree chiave di innovazione.

L'integrazione tra l'intelligenza artificiale e il machine learning con questi software, può essere molto importante. Una volta che l'IA sarà allenata con grandi quantità di circuiti la si potrà utilizzare per ottimizzare i circuiti che gli vengono forniti. Tra le varie ottimizzazioni ci sarà:

- una riduzione di costi per creare i circuiti, in quanto alcune funzionalità possono essere ricreate utilizzando componenti diverse a volte meno costose;

- la prevenzione dai guasti, e quindi l'individuazione più veloce del punto incriminato e la sua risoluzione;
- traducendo il circuito in uno più semplice sarà più semplice interpretare i risultati ottenuti.

Parallelamente, l'adozione di infrastrutture cloud e la simulazione distribuita offrono la possibilità di eseguire simulazioni di grande scala in maniera più efficiente. Questo approccio non solo democratizza l'accesso a risorse computazionali potenti ma anche facilita la collaborazione tra team dislocati geograficamente, accelerando il ciclo di sviluppo dei progetti elettronici.

Un aspetto fondamentale per l'accessibilità e l'efficacia dei simulatori è rappresentato dal miglioramento dell'interfaccia utente. Rendere i simulatori più intuitivi e semplici da utilizzare permette agli ingegneri di concentrarsi sulla progettazione piuttosto che sulla complessità degli strumenti, rendendo la simulazione un processo più agile e meno soggetto a errori.

Infine, il continuo supporto per nuove tecnologie emerge come un imperativo. I simulatori devono evolversi per stare al passo con i progressi dei vari campi. Questo non solo assicura che gli strumenti di simulazione rimangano rilevanti di fronte al rapido avanzamento tecnologico ma anche che gli ingegneri abbiano a disposizione le risorse necessarie per sperimentare e esplorare nuove soluzioni per risolvere i problemi odierni.

In sintesi, questi sviluppi futuri delineano un percorso entusiasmante per il campo della simulazione di circuiti elettronici, sottolineando l'importanza dell'innovazione tecnologica e della facilità d'uso nell'affrontare le sfide del futuro. Con queste innovazioni, gli ingegneri saranno meglio equipaggiati per progettare i dispositivi elettronici di domani, spingendo i confini di ciò che è possibile realizzare.

Capitolo 6

Conclusioni

In questa tesi, abbiamo esaminato e confrontato approfonditamente due categorie fondamentali di simulatori circuitali: quelli numerici e quelli simbolici, con un focus specifico sui loro impieghi nel contesto dell'analisi di circuiti analogici e con l'esempio del filtro Tow-Thomas. Attraverso questo confronto, è stato possibile evidenziare come ciascun approccio presenti vantaggi e limitazioni distinti, i quali possono influenzare significativamente la scelta dello strumento più adeguato a seconda del contesto applicativo.

Il confronto tra queste due categorie di software, attraverso l'analisi di specifici strumenti come LTSpice, PLECS e SapWin, ha rivelato differenze significative in termini di approcci alla simulazione, capacità, e applicazioni pratiche.

I simulatori numerici, con la loro capacità di fornire risultati rapidi e accurati per circuiti di complessità variabile, si sono dimostrati strumenti indispensabili per l'analisi e la progettazione in tempo reale, soprattutto in situazioni dove è richiesta una grande precisione. D'altra parte, i simulatori simbolici, offrendo una comprensione più profonda delle relazioni intrinseche tra i vari componenti del circuito, si rivelano particolarmente preziosi nelle

fasi di ottimizzazione del design e nell'educazione, dove la comprensione dei principi sottostanti è fondamentale.

6.1 LTspice e PLECS a confronto

Come abbiamo ampiamente visto in questa tesi, LTspice e PLECS sono due simulatori analogici **numerici**. A seguito dell'analisi svolta sono emersi i punti di forza e le differenze dei vari software.

Per quanto riguarda **LTspice**:

- è efficiente nella simulazione di circuiti analogici, soprattutto per quanto riguarda componenti attivi come transistor e diodi anche grazie alla sua ottimizzazione e al vasto database di componenti.
- è dispone di un'interfaccia relativamente semplice e diretta, anche se può risultare un po' datata e meno intuitiva per gli utenti meno esperti
- è molto flessibile poichè supporta vari tipi di analisi come DC, AC, transitorio.
- da tenere in considerazione che LTSpice è completamente gratuito, il che lo rende molto accessibile per studenti e professionisti.

Invece per **PLECS**:

- è più efficiente nella simulazione di sistemi elettrici di potenza e nel controllo di sistemi elettromeccanici.
- ha un'interfaccia utente grafica (GUI) moderna e intuitiva, che facilita la progettazione e la simulazione di sistemi complessi attraverso l'uso di schemi a blocchi e modelli fisici.

- eccelle nella simulazione di sistemi dinamici e nella modellazione di sistemi di controllo, grazie alla possibilità di integrare facilmente modelli matematici e fisici, inoltre supporta sia la simulazione nel tempo che la modellazione di sistemi in spazio di stato.
- è un software commerciale, con diverse opzioni di licenza che possono rappresentare un investimento significativo, specialmente per piccole imprese o utenti individuali.

In conclusione, La scelta tra LTSpice e PLECS dipende principalmente dal tipo di progetto e dalle specifiche esigenze di simulazione. LTSpice è ideale per la simulazione dettagliata di circuiti analogici, specialmente quando il costo è un fattore critico. PLECS, d'altra parte, è preferibile per la progettazione e l'analisi di sistemi elettrici di potenza e sistemi di controllo, dove la complessità del sistema richiede un approccio di modellazione integrato e flessibile.

6.2 Simulatori analogici numerici e simbolici a confronto

Includiamo nel confronto di prima anche **SapWin**, che abbiamo ormai detto essere un simulatore **simbolico**. Le caratteristiche principali che abbiamo riscontrato sono:

- come simulatore simbolico, supporta anche risultati numerici, e quindi ci fornisce una maggiore comprensione del circuito
- presenta un'interfaccia grafica intuitiva che facilita la progettazione e la simulazione di circuiti, gli utenti possono disegnare schemi circuitali

utilizzando un'ampia gamma di componenti e visualizzare i risultati dell'analisi in vari formati, inclusi diagrammi di Bode, Nyquist, e risposte transienti.

- con un ampio database di componenti, SapWin permette di modellare una grande varietà di circuiti, come elementi passivi, semiconduttori, fonti di alimentazione.
- è un ottimo strumento per l'istruzione, consentendo agli studenti di comprendere non solo come funzionano i circuiti, ma anche perché funzionano in quel modo.
- il suo utilizzo si limita però allo studio di circuiti con pochi componenti, poichè più numerosi sono i componenti più è grande la formula risultante.

In conclusione, la versatilità dei simulatori analogici simbolici è indiscutibile, ma diventa limitante per i circuiti che presentano molte componenti. Infatti, in quei casi, la formula risultante finale è molto lunga e di difficile comprensione.

6.3 Conclusioni finali

In questa tesi abbiamo attraversato un viaggio nel mondo dei simulatori circuitali, mettendo a confronto gli approcci simbolici e numerici, con un focus particolare sull'analisi di circuiti analogici e il filtro Tow-Thomas. Questo lavoro ci ha permesso di delineare le distinte applicabilità con i punti di forza e le limitazioni intrinseche di questi strumenti, essenziali per la progettazione e l'analisi di circuiti in ingegneria elettronica.

LTSpice e PLECS, rappresentanti dei simulatori numerici, hanno evidenziato la loro indispensabilità nell'ambito dell'analisi e progettazione rapida e precisa, particolarmente nelle fasi di verifica e test, dove la specificità e l'accuratezza dei dati numerici guidano verso soluzioni ottimali e tempestive. Tali strumenti si rivelano fondamentali quando si richiede un feedback immediato sul comportamento del circuito in condizioni operative reali, soprattutto in contesti industriali dove la rapidità di iterazione e l'affidabilità dei risultati sono cruciali.

D'altro canto SapWin, incarnando l'approccio simbolico, si afferma come un caposaldo nella formazione e nella comprensione teorica dei circuiti, offrendo una visione più astratta e generale dei principi che regolano i sistemi elettronici. Questo strumento si dimostra particolarmente prezioso nelle fasi di ottimizzazione del design e nella formazione accademica, dove l'intuizione e la comprensione delle dinamiche sottostanti sono fondamentali.

La scelta tra l'utilizzo di simulatori numerici o simbolici non si configura, dunque, come un dilemma basato su una superiorità intrinseca dell'uno sull'altro, ma piuttosto su un'accurata valutazione delle esigenze specifiche del progetto, del contesto applicativo, e degli obiettivi di apprendimento o di ricerca. La complementarità di questi strumenti suggerisce un approccio integrato, dove l'analisi numerica fornisce precisione e dettaglio, mentre quella simbolica arricchisce la comprensione teorica e supporta l'ottimizzazione.

In sintesi, l'evoluzione continua della tecnologia e delle metodologie di simulazione circuitale promette di ampliare ulteriormente le frontiere della progettazione elettronica, offrendo agli ingegneri strumenti sempre più potenti e adattivi. La comprensione profonda delle caratteristiche e delle potenzialità di ciascun tipo di simulatore sarà, dunque, sempre più determinante nel navigare con successo il complesso panorama dell'ingegneria moderna.

Capitolo 7

Ringraziamenti

Durante questi 6 anni sono stato seguito, curato e coccolato da tante persone. Proverò a ringraziarle tutte, conscio del fatto che mi dimenticherò sicuramente di qualcuno. Innanzi tutto la mia famiglia che c'è sempre stata e che non mi ha mai scoraggiato, mamma, babbo, Leonardo, Letizia e Luigi, ma anche i miei nonni e parenti più vicini. I miei migliori amici che tra una battuta e l'altra erano sempre presenti, hanno capito e ascoltato le mie difficoltà senza giudicarmi: Federica, Gabriele, Matteo, Lorenzo, Luca e Martina. A questo infinito elenco voglio aggiungere anche tutte le persone meravigliose che ho conosciuto all'università: Marco M, Guglielmo, Mouna, Isabel, Chiara, Emanuele, Gabriele, Cosmin, Leonardo D, Gianni, Matteo, Cosimo, Leonardo P, Filippo, Girolamo, Mirko, Lapo, Maria Vittoria, Niccolò M, Sofia, Sebastiano, Jori, Waris, Marco C.

Ringrazio tutti coloro che hanno abitato con me e che abitano ancora: Giacomo, Vito, Lorenzo, Matteo M, Alessio, Matteo P, Nabil, Filippo, Simone, Jovo, Piergiorgio, Samuele, Marco.

Ringrazio anche tutti coloro che mi sono stati avvicinati dall'AC: Giuseppe, Federico, Alessandro, Lorenzo e molti altri...

Ringrazio il mio relatore e corelatore per la disponibilità e la semplicità, conscio del fatto di avergli dato non pochi grattacapi.

Ringrazio i miei compagni di squadra Snow Kids, che non hanno condiviso grandi vittorie, ma comunque molto divertimento.

Ma alla fine ringrazio finalmente me, che non mi sono arreso, che non mi sono fatto sopraffare e che anche quando sembrava davvero dura non ho smesso di lottare.

Per tutti gli appassionati:



Figura 7.1: Scannerizzami

Bibliografia

- [1] Cadence. Guida di spice. <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2022-how-does-spice-simulation-work>. Guida di Spice.
- [2] Edutecnica.it. Amplificatore operazionale. <https://www.edutecnica.it/elettronica/ao/ao.htm>. Descrizione degli op-amp.
- [3] Francisco V. Fernandez, Angel Rodriguez-Vazquez, Jose L. Huertas, and Georges G. E. Gielen. *Symbolic Analysis Techniques: Applications to Analog Design Automation*. IEEE Press, New York, NY, 1998.
- [4] J.B. Grimbleby. Algorithm for finding the common spanning trees of two graphs. *Electronics Letters*, 17(13):470–471, Jun 1981. Accessed: inserisci data di accesso qui.
- [5] Antonio Luchetta, Stefano Manetti, and Alberto Reatti. Sapwin—a symbolic simulator as a support in electrical engineering education. *IEEE Transactions on Education*, 44(2):213, May 2001.
- [6] Renzo Perfetti. *Circuiti elettrici*. Zanichelli, Milano, 2013.
- [7] PLECS. Manuale di plects. <https://www.plexim.com/files/plecsmanual.pdf>. Manuale d’uso di PLECS.

-
- [8] Vishal V. Mehtre Samarth Gosavi, Rushi Ambure. Study of euler's method. <https://ijireeice.com/wp-content/uploads/2022/11/IJIREEICE.2022.101102.pdf>. Spiegazione del metodo di Eulero.
- [9] Ahmed M. Soliman. History and progress of the tow-thomas bi-quadratic filter. part i: Generation and op amp realizations. *Journal of Circuits, Systems, and Computers*, 17(1):33–54, 2008.
- [10] Wikipedia. Ltspice. <https://en.wikipedia.org/wiki/LTspice>. Pagina di Wikipedia di LTspice.
- [11] Wikipedia contributors. File:op-amp internal.svg, 2023. Accessed: 2023-03-26.