

Elettronica per i Sistemi Mobili di Telecomunicazioni (ESMT)

Note introduttive all'uso di Advanced Design System (ADS)

La rapida espansione delle moderne applicazioni wireless (telefonia mobile, Wireless Local Area Network o WLAN, satellitari, ect.), ha portato allo sviluppo di CAD tool dedicati (special purpose) alla progettazione di Circuiti Integrati a Radiofrequenza (RFIC) ed in grado di superare i limiti dei simulatori tradizionali (general purpose) come Spice che risulta pertanto inadeguato. I principali CAD oggi in uso sono Cadence e Advanced Design System (ADS). Questi costituiscono piattaforme software su cui sono montati i vari tool e simulatori a disposizione dei progettisti. In queste note introduttive sarà effettuata una breve panoramica sulle innumerevoli potenzialità del CAD tool ADS (con riferimento alla versione 2003A) e si chiarirà l'uso del simulatore relativamente alle analisi DC, AC e S-Parameter mediante alcuni esempi incontrati in una parte (!) delle esercitazioni del corso di Elettronica dei Sistemi Mobili di Telecomunicazione.

1.1 Struttura di ADS

ADS è stato sviluppato specificatamente per seguire l'intero percorso del segnale in un sistema di comunicazione: permette di integrare un'ampia varietà

di simulazioni, da quelle tipiche a radiofrequenza a quelle per DSP (*Digital Signal Processing*). Comprende inoltre un simulatore elettromagnetico 2D e ½ (Momentum) per la simulazione elettromagnetica (EM), il tutto in un unico ambiente flessibile, disponibile su più sistemi operativi tra cui anche Windows (in ambiente Win32, è fra il CAD più diffuso).

Da una finestra principale (*main*) si possono creare e gestire le diverse viste di un progetto (*schematic, layout, symbol*); i risultati delle simulazione, i cui *file* sono immagazzinati in un'apposita cartella, possono essere visualizzati tramite una interfaccia grafica (*Data Display*). Tutti i lavori devono essere salvati in una cartella (*project directory*) che contiene al suo interno diverse sotto-cartelle (*subdirectory*) nelle quali vengono suddivisi i vari file relativi al progetto:

- *networks* contiene le informazioni su *schematic* e *layout*, così come tutte le altre indicazioni richieste per la simulazione;
- *data* è la directory dove vengono immagazzinati per default i file utilizzati per l'ingresso e l'uscita dei dati o quelli generati dal simulatore;
- *mom_dsn* contiene i progetti (design) creati con il simulatore planare elettromagnetico, *momentum*;
- *synthesis* raccoglie i design creati tramite l'interfaccia DSP e i tool di sintesi;
- *verification* contiene i file generati da DRC (*Design Rule Checker*), usato con il layout.

ADS permette di simulare circuiti e sistemi RF, e grazie a numerose opzioni consente di raggiungere specifici obiettivi del progettista di RFIC. Le simulazioni disponibili sono: DC, AC, parametri S, Harmonic Balance, e Transient, con alcune loro varianti.

1.2 Analisi DC

Un'analisi di tipo DC calcola le grandezze a regime di un circuito sottoposto a grandezze continue (costanti nel tempo). È utile per valutare il punto di riposo,

il consumo di potenza statica, noise margin e fan-out nei circuiti digitali, funzioni di trasferimento, e molto altro. In più, l'analisi DC è usata per trovare i punti iniziali di altri tipi di simulazioni, quali AC e Transient.

Per un'analisi DC, il simulatore effettua i seguenti passi:

1. Tutti i condensatori sono rimossi dal circuito (sostituiti con circuiti aperti).
2. Tutti gli induttori sono sostituiti con cortocircuiti.
3. Per creare le equazioni circuitali, viene impiegata un'analisi nodale modificata. Questo procedimento porta ad un'equazione per ogni nodo del circuito, più un'equazione per ogni sorgente di tensione. È usata un'analisi nodale modificata poiché un generatore di tensione ideale, o un'induttanza, non possono essere rappresentati tramite un'analisi standard. Per risolvere tale problema, vengono incluse delle equazioni di maglia (una per ogni generatore o induttore) nel set delle equazioni di nodo. Le tensioni di nodo e le correnti nei generatori, dunque, sono le quantità incognite, che formano un vettore x . Il sistema può essere espresso come $F(x)=0$.
4. Dato che le equazioni sono non lineari, per la loro risoluzione occorre usare un metodo iterativo (Newton non lineare, Gauss-Seidel non lineare, etc.).

1.3 Analisi AC

La simulazione AC, consiste in un'analisi lineare per piccoli segnali. Anche se non specificato, viene calcolato preventivamente il punto di riposo in continua del circuito. I dispositivi non lineari eventualmente presenti vengono linearizzati attorno al punto di riposo stesso: ne scaturisce un circuito lineare sul quale viene eseguita la simulazione AC.

Il progettista può scegliere se effettuare i calcoli su un singolo punto in frequenza o su un range "scandagliato" linearmente o in maniera logaritmica. Essendo un'analisi di tipo lineare, non genera né armoniche di ordine superiore né spurie, ed è tipicamente utilizzata per ottenere i classici parametri per piccoli segnali, quali il guadagno di tensione, di corrente e di potenza, etc.

1.4 *Analisi a parametri S*

Una simulazione di tipo S_Parameter si basa sull'analisi fasoriale per calcolare la risposta in frequenza di un circuito. È utile per valutare i vari tipi di guadagno (soprattutto quelli di potenza), le impedenze d'ingresso e uscita, la cifra di rumore in funzione di frequenza e/o condizioni di polarizzazione, etc.

I passi in cui si articola sono i seguenti:

1. con un'analisi DC si valuta il punto di riposo;
2. viene costruito un circuito linearizzato nel punto di riposo. Per fare ciò, tutti gli elementi non lineari sono sostituiti dai loro equivalenti lineari. Per esempio, un generatore di corrente non ideale del tipo $I = aV_1^2 + bV_2^3$, viene sostituito da un generatore controllato in tensione, di tipo lineare, $I = V_1(2aV_{1q}) + V_2(3bV_{2q}^2)$;
3. tutti gli induttori e i condensatori sono sostituiti da impedenze complesse, e le conduttanze sono calcolate alla frequenza d'interesse;
4. viene adottata un'analisi nodale per ridurre il circuito ad una matrice algebrica a coefficienti complessi. Le tensioni possono essere trovate tramite l'applicazione di un vettore di input (che rappresenta i generatori di corrente e tensione indipendenti), ed il metodo di risoluzione gaussiano.

L'analisi a parametri S ha delle limitazioni, infatti, ad esempio, non possono essere modellizzati:

- Distorsioni dovute ai più svariati fattori;
- Limitazioni imputabili a slew-rate;
- Mixer analogici;
- Oscillatori.

Il trattamento del rumore viene preso in considerazione includendone le sorgenti relative delle model dei dispositivi inclusi nello schematico. Tipici esempi includono rumore termico nei resistori, shot e flicker nei dispositivi a semiconduttore. Si tiene conto di questi effetti con dei generatori indipendenti, che vengono trattati dal simulatore come tali.

1.5 Analisi Harmonic Balance

Harmonic Balance (HB) è un'analisi nel dominio della frequenza usata per valutare le grandezze elettriche nei sistemi non lineari. Con un'analisi AC non è possibile valutare l'effetto delle distorsioni prodotte dal circuito. Accade infatti che, all'aumentare dell'ampiezza dei segnali di sollecitazione, a causa delle inevitabili non linearità, nel circuito si generano segnali a frequenza multiple della sollecitazione. L'analisi HB valuta la risposta del sistema a sollecitazioni con grandi segnali direttamente nello stato stazionario, senza bisogno di simulare il transitorio iniziale. Questa quindi è di notevole aiuto per la simulazione dei sistemi a microonde e radiofrequenza, dato che questi trattano segnali sotto forma di portanti modulate (segnali a banda relativa stretta). Un'analisi transitoria richiederebbe infatti un notevole carico per l'elaboratore dal momento che è richiesta una finestra di simulazione in grado di osservare il segnale modulante (KHz - MHz) con un passo d'integrazione tale dettato dalla portante (GHz). Pensando ai moderni sistemi di comunicazione che impiegano modulazioni digitali, l'integrazione numerica richiesta nell'analisi della trasmissione di mille simboli risulterebbe a dir poco proibitiva.

HB opera nel dominio della frequenza, contrariamente a SpectreRF di Cadence che opera nel dominio del tempo. Solitamente gli algoritmi di calcolo che operano nel dominio della frequenza sono più robusti verso l'instabilità numerica rispetto a quelli nel dominio del tempo; per contro, i dispositivi non lineari sono spesso modellizzati nel dominio del tempo. Con la formulazione delle equazioni differenziali direttamente nel dominio della frequenza, l'analisi HB permette di effettuare le simulazioni non lineari di dispositivi caratterizzati da matrici di parametri S, che con SpectreRF invece non è possibile effettuare.

Tramite HB, è possibile:

1. determinare il contenuto spettrale di tensioni e correnti;
2. valutare quantità come il punto di compressione ad 1 dB, punto di intercetta del terzo ordine, ect.;
3. eseguire analisi di tipo load-pull per gli amplificatori di potenza;
4. effettuare analisi di rumore per dispositivi non lineari (non linear noise).

In sostanza, Harmonic Balance è un potente strumento nelle mani del progettista, e consente, se usato propriamente, di ridurre molto i tempi di design.

1.6 Analisi Large-Signal S-Parameter

L'analisi *Large-Signal S-Parameter* (LSSP) calcola i parametri S di circuiti non lineari, come ad esempio amplificatori di potenza o mixer. A differenza della simulazione a parametri S di piccolo segnale (che si basa su una linearizzazione del circuito), la LSSP estrae i parametri S in seguito ad un'analisi Harmonic Balance. Siccome HB è una tecnica orientata verso i grandi segnali, le sue soluzioni comprendono tutti gli effetti non lineari come ad esempio i fenomeni di distorsione. Questo fa sì che i parametri S estratti dall'analisi in questione, possano variare secondo il livello di potenza che è stato inserito nel circuito.

Prima di effettuare la simulazione è necessario applicare le “porte” a tutti gli ingressi e le uscite. I parametri S vengono infatti calcolati per ogni porta inserita.

I passi compiuti dal simulatore, per un circuito a due porte, sono i seguenti:

1. termina la porta 2 con il complesso coniugato della sua impedenza di riferimento. Applica un segnale di potenza P_1 alla porta 1, utilizzando una sorgente con impedenza uguale al complesso coniugato di quella di riferimento della porta stessa. Utilizza la tecnica Harmonic Balance per calcolare correnti e tensioni alle due porte. Da queste informazioni ricava S_{11} e S_{21} .
2. Termina la porta 1 con il complesso coniugato della sua impedenza di riferimento. Applica un segnale di potenza $P_2 = |S_{21}|^2 P_1$ alla porta 2, utilizzando una sorgente con impedenza uguale al complesso coniugato dell'impedenza di riferimento della porta 2. Utilizza Harmonic Balance per calcolare correnti e tensioni alle due porte. Da queste informazioni ricava S_{12} e S_{22} .

1.7 Analisi XDB

La simulazione XDB consiste in un'analisi che permette di calcolare il punto di compressione a X dB di un circuito (amplificatore, mixer, etc.). La tecnica di simulazione utilizzata è HB, in quanto è necessario tenere conto del comportamento non lineare del circuito in esame. Bisogna inserire all'ingresso del circuito la sorgente di potenza disponibile P_{ITone} e terminare l'uscita con delle terminazioni (*term*). Inoltre l'ingresso e l'uscita devono essere numerati propriamente, in quanto il calcolo del punto di compressione viene effettuato facendo riferimento a tali numerazioni. Per valutare il punto di compressione richiesto, il simulatore opera nel seguente modo:

1. inserisce in ingresso al circuito una quantità di potenza molto bassa per ricercare il guadagno di potenza del circuito per piccoli segnali;
2. una volta trovato il guadagno per piccoli segnali, aumenta il livello di potenza in ingresso, fino a che viene trovato il punto di compressione a X dB in uscita.

1.8 Analisi Transient

L'analisi *transient* è il tipo di simulazione più onerosa che un software può svolgere, poiché analiticamente è molto complessa da calcolare e richiede tipicamente oltre 1000 volte il tempo che la CPU impiega per una DC o per una AC.

Questa simulazione in ADS risolve un insieme di equazioni integro-differenziali, che esprimono la dipendenza dal tempo, delle correnti e delle tensioni del circuito. Prima di effettuare ogni calcolo, anche se non specificato, viene valutato il punto di riposo in continua, per determinarne la soluzione all'istante zero. Il tale risultato può essere ottenuto anche in circuiti dove sono presenti componenti distribuiti che hanno un comportamento dipendente dalla frequenza, come ad esempio microstrisce ed elementi descritti con i parametri S. In questo caso si parla più propriamente di *Convolution Analysis*.

In tal caso, il simulatore converte le informazioni sui componenti, dal dominio della frequenza a quello del tempo. Di fatto questo consiste nel

generarne la risposta impulsiva, che verrà convoluta con il segnale temporale in ingresso all'elemento in esame, per ricavare il segnale di uscita.

In un'analisi transitoria il tempo viene discretizzato in intervalli, detti *step temporali*. Tipicamente gli step temporali sono di lunghezza diversa, con i minori che vengono presi durante le porzioni della simulazione in cui le tensioni e le correnti cambiano più rapidamente. I condensatori e gli induttori del circuito vengono rimpiazzati da generatori, con la procedura che ci si appresta a descrivere, come per esempio, per un condensatore.

La corrente in un condensatore è data da $I_c = C \frac{dV_c}{dt}$. La derivata nel tempo può essere approssimata dalla seguente equazione alle differenze:

$$I_c^k + I_c^{k-1} = 2C \frac{V_c^k - V_c^{k-1}}{t^k - t^{k-1}}.$$

In questa equazione, l'apice k rappresenta il numero associato allo step temporale: in altre parole, k è lo step per cui si sta risolvendo e $k-1$ è lo step precedente. Dall'espressione si può ricavare la corrente che attraversa il condensatore allo step k - esimo :

$$I_c^k = V_c^k \left(\frac{2C}{\Delta t} \right) - V_c^{k-1} \left(\frac{2C}{\Delta t} \right) - I_c^{k-1}.$$

In questo caso, $\Delta t = t^k - t^{k-1}$, ovvero la lunghezza dell'intervallo temporale; pertanto, con l'avanzare del tempo, V_c^{k-1} diventa V_c^k , ed I_c^{k-1} diventa I_c^k . Si noti che gli ultimi due termini a destra dell'uguale nell'espressione scritta, dipendono solamente dalla tensione e dalla corrente dell'intervallo precedente, e sono dunque costanti se ci si riferisce all'intervallo per cui si risolve. Il primo termine è effettivamente una conduttanza $\left(g = \frac{2C}{\Delta t} \right)$ moltiplicata per la tensione sul condensatore, e gli altri due possono essere rappresentati ciascuno da un generatore di corrente indipendente. L'intero modello transitorio per il

condensatore consiste, dunque, in una conduttanza in parallelo a due generatori di corrente (i cui valori sono, chiaramente, differenti per ogni step).

Una volta che condensatori ed induttori sono stati sostituiti come mostrato, viene applicato il normale metodo di analisi DC, per ogni punto temporale: questa è la ragione per cui l'analisi transitoria è così computazionalmente pesante. Quello appena descritto è il metodo di integrazione trapezoidale (interpolazione lineare).

ADS può risolvere le equazioni integro-differenziali anche tramite un'interpolazione polinomiale, che si basa sulla generazione di curve polinomiali (di cui può essere scelto l'ordine), valide nei vari intervalli temporali.

1.9 Esempi

Per capire come effettuare le simulazioni descritte, saranno esposti alcuni semplici esempi, con riferimento ai contenuti delle esercitazioni di Elettronica dei Sistemi Mobili di Telecomunicazione.

In particolare, si illustreranno i casi relativi all'impiego sia dei transistori bipolari, sia dei transistori MOS.

Non hanno la pretesa di illustrare tutte le enormi potenzialità del software, per le quali si rimanda alla documentazione consultabile on-line sul sito web della casa produttrice (<http://eesof.tm.agilent.com/docs>).

C'è da sottolineare che quelli che saranno presentati, sono solo alcuni dei modi per ottenere certe grandezze, e serviranno soprattutto per capire quali sono i passi fondamentali da seguire per impostare una simulazione e ricavarne i dati desiderati.

Chiaramente, con le dovute modifiche, tali procedimenti possono essere estesi per il test di sistemi più complessi, e per ricavare altre quantità.

Per quanto segue, si è fatto riferimento al design-kit di AMS (Austriamicrosystems).

1.10 Esempio con transistori MOS

Verranno allestite due tipi di simulazioni: DC e AC. Il dispositivo in esame sarà un transistore MOS nella versione ottimizzata per le alte frequenze (NMOSRF). La prima analisi è necessaria per tracciare le caratteristiche statiche di uscita, l'altra per ricavare il valore della transconduttanza (g_m , relativa al modello per piccoli segnali) al variare della polarizzazione.

Dopo aver lanciato il programma, va generato un nuovo progetto. Bisogna dunque andare su *File* → *New Project*, settare l'unità di misura (tipicamente micron), ed inserire il nome del progetto (ad esempio, *prova*).

Il software creerà una cartella *prova_prj*, dentro la quale saranno costituite tutte le sottocartelle, in cui il simulatore metterà i dati risultanti dalle simulazioni.

Compite queste operazioni, compare una finestra per la creazione dello schematico in cui porre i vari simboli degli elementi del circuito (Figura 1.1).

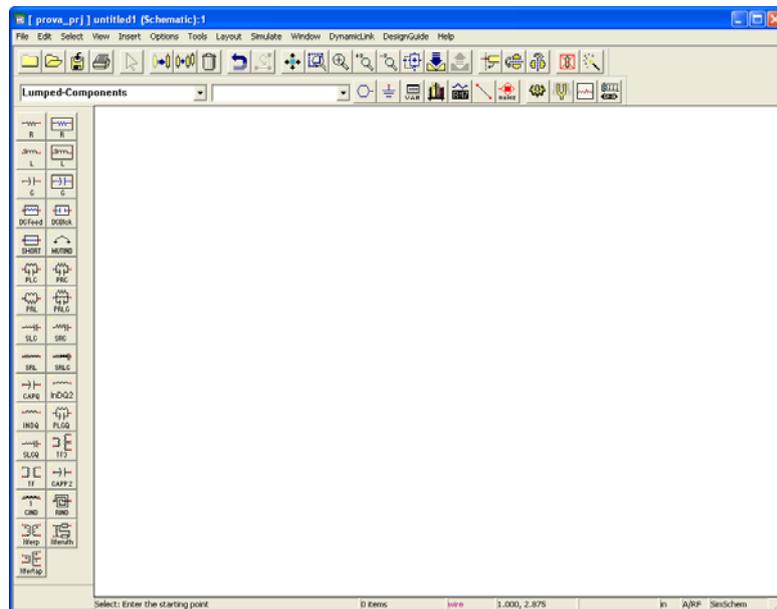


Figura 1.1: Finestra principale di ADS (Schematico)

Inoltre, occorre indicare al simulatore quale la cartella contiene le model relative al design kit di che si sta usando. Per questo, dal menù a scorrimento che contiene tutte le categorie degli oggetti disponibili, sotto la voce *PRIMLIB*, selezionare e inserire nello schematico il componente *Set Model Path* (Figura 1.2).

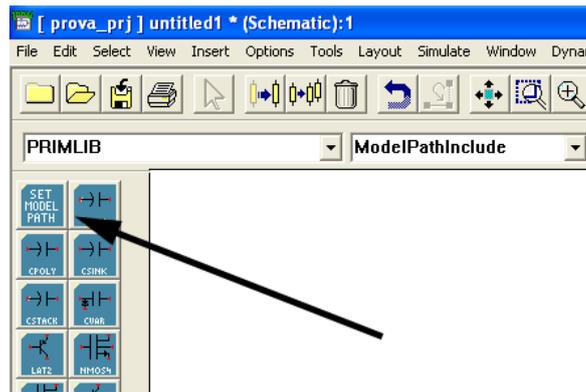


Figura 1.2: Set Model Path

Si può adesso procedere al disegno del circuito. Il transistor che sarà testato si trova nel menù dei componenti, sotto la categoria *PRIMLIBRF*, ed è denominato *nmosrf* (Figura 1.3).

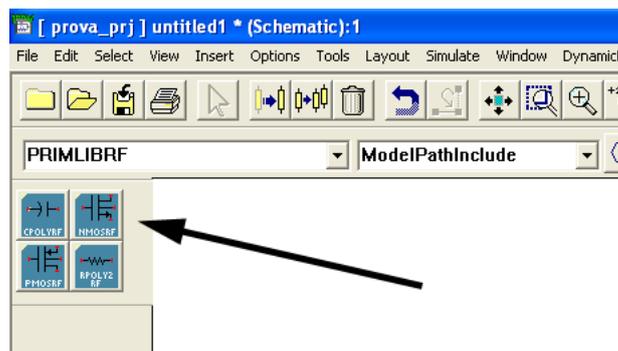


Figura 1.3: Transistor NMOS a radiofrequenza

Una volta piazzato nella finestra, appare con il suo simbolo, accompagnato per default da una serie di parametri che ne elencano le caratteristiche (Figura 1.4).



Figura 1.4: Model del transistor NMOS

Per cambiare tali parametri, si può agire direttamente sullo schematico, o aprire la finestra delle proprietà cliccando due volte sul simbolo del MOSFET, come mostrato in Figura 1.5.

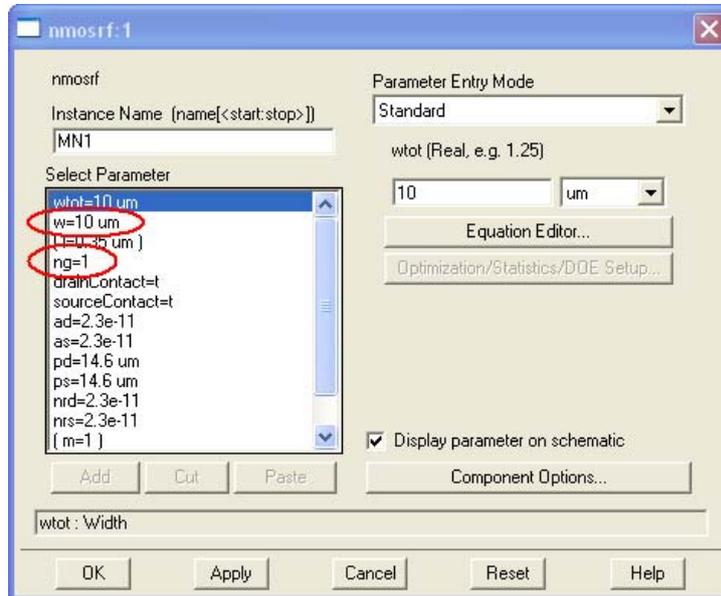


Figura 1.5: Proprietà del MOSFET

Da qui si può attribuire un nome all'istanza del transistor, scegliere quali informazioni riportare nello schematico, e cambiare il valore di solo alcune grandezze (la maggior parte delle opzioni sono infatti “technology dependent” e non possono essere modificate). In pratica, il progettista può agire direttamente solo su due parametri: w e ng . Il primo rappresenta la larghezza del finger di gate e può essere posto a $5\ \mu\text{m}$ o $10\ \mu\text{m}$; il secondo rappresenta invece il numero di finger da mettere in parallelo. Il risultato del prodotto $ng \times w$ viene automaticamente messo nel campo $wtot$, che rappresenta la larghezza totale del gate equivalente (la lunghezza è fissata a $0.35\ \mu\text{m}$).

A questo punto si procede inserendo gli altri componenti. Servono due generatori di tensione (per V_{DS} e V_{GS}) ed una sonda (amperometro) che misuri la corrente I_{DS} . Il tutto va poi collegato tramite fili; la massa (*ground*) indicherà il potenziale di riferimento.

Si ricorda che alcuni componenti si trovano ripetuti in categorie diverse, e che la procedura illustrata costituisce soltanto uno dei possibili modi di operare.

I generatori di tensione possono essere trovati nel menù dei componenti, sotto la voce *Sources-Freq Domain*, mentre la sonda (probe) di corrente nella categoria *Probe Components*.

Per V_{DS} va preso il componente V_{DC} , mentre per V_{GS} si può utilizzare V_{AC} (il motivo di questa scelta sarà chiaro più avanti), come mostrato in Figura 1.6. L'amperometro è denominato invece I_{Probe} (Figura 1.7).

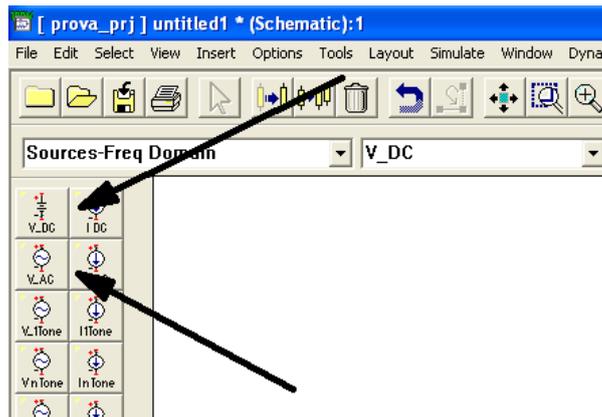


Figura 1.6: Generatori di tensione

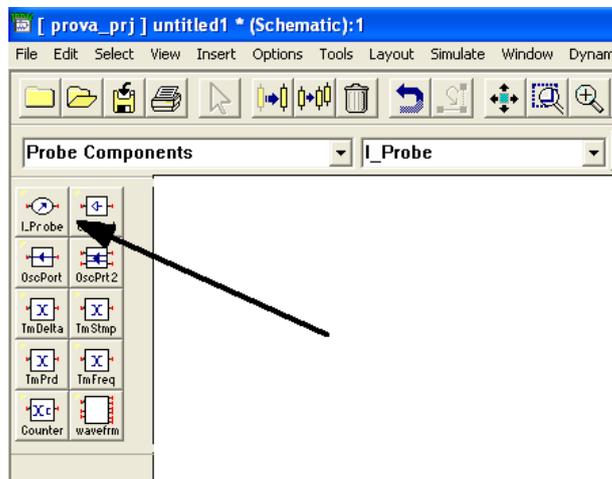


Figura 1.7: I_{Probe} (sonda di corrente)

I fili (*wire*) e la massa (*ground*) sono già disponibili nella finestra principale, in quanto elementi di uso frequente (la barra degli strumenti è comunque personalizzabile), come illustrato in Figura 1.8.

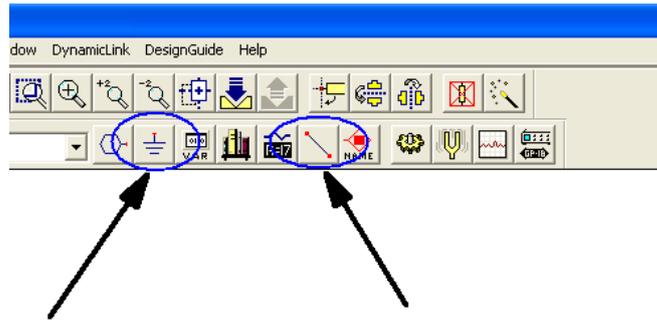


Figura 1.8: Ground e wire

Si può ora procedere alla connessione dei vari elementi piazzati nello schematico, per giungere al circuito di Figura 1.9.

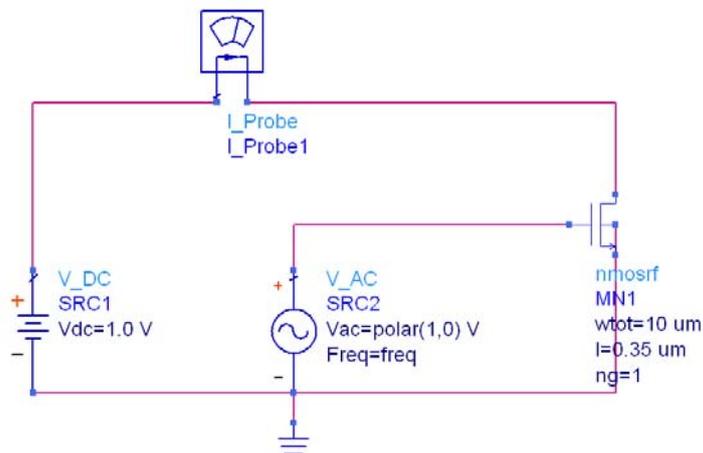


Figura 1.9: Circuito schematico

Si noti che il terminale di substrato è stato posto in cortocircuito con il terminale di source.

Successivamente occorre settare i nuovi componenti inseriti. Si comincia dalla sonda di corrente, che può essere rinominata in modo più significativo come I_{DS} , ad esempio. Per fare ciò, basta un doppio click sul simbolo corrispondente, o un singolo click sul nome che gli viene assegnato per default (I_{Probe} è la classe a cui appartiene l'elemento, I_{Probe1} è il nome della specifica istanza).

Con un doppio click sul generatore corrispondente a V_{DS} si apre la finestra delle proprietà (Figura 1.10).

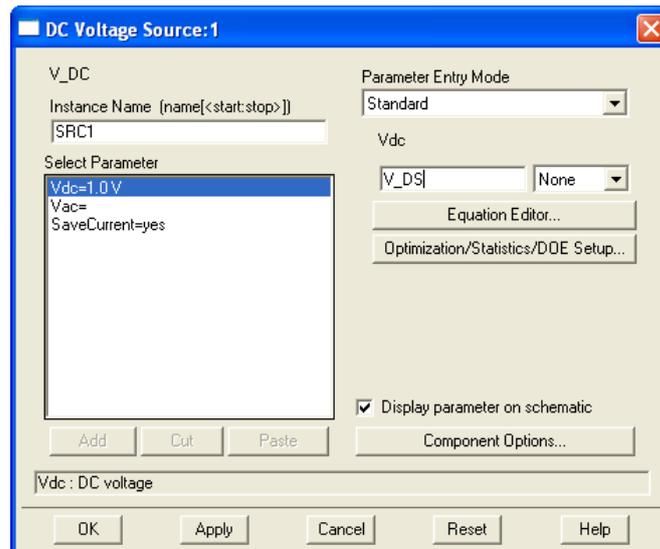


Figura 1.10: Proprietà del generatore di tensione drain-source

In questo caso, si può lasciare il nome dell'istanza che viene assegnato per default (*SRC1*), ma va cambiato il valore della tensione che il generatore deve erogare. Dal momento che l'obiettivo è quello di effettuare uno sweep sulla V_{DS} , non si immetterà un numero, ma una variabile, V_{DS} .

Una cosa analoga va fatta per il generatore V_{GS} , la cui finestra delle proprietà è visualizzata in Figura 1.11.

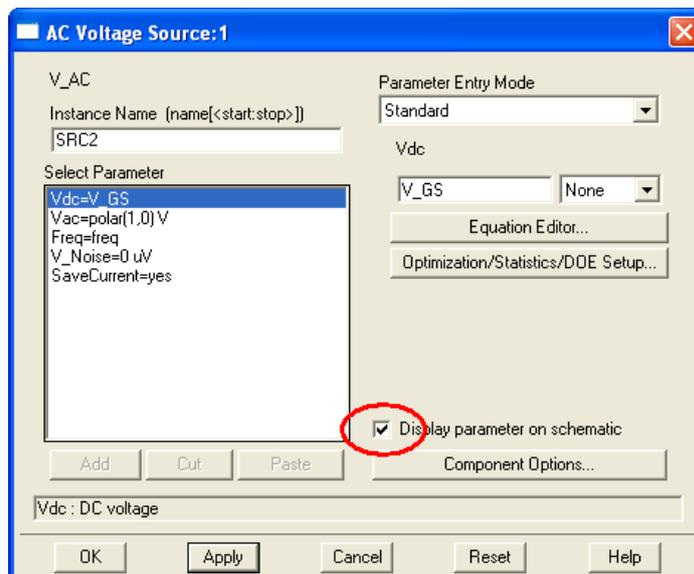


Figura 1.11: Proprietà del generatore di tensione gate-source

Non bisogna farsi ingannare dal nome della categoria a cui appartiene l'elemento in questione, poiché viene data la possibilità di settare anche una

componente continua. Anche in questo caso, visto che si effettuerà uno sweep della V_{GS} , si inserisce un nome simbolico (V_{GS}), e, per ricordarsi della presenza della continua, si spunta il box relativo all'opzione di visualizzazione (*Display parameter on schematic*). Il valore del segnale alle variazioni (V_{ac}) può essere lasciato ad 1 V, con fase nulla, visto che, in ogni caso, la simulazione AC non tiene conto delle non linearità (per gli scopi prefissati, un qualunque valore va bene, basta averne memoria).

Per indicare al simulatore che i valori dei generatori sono effettivamente delle variabili, bisogna inserire il componente che le definisce, presente nella finestra principale (Figura 1.12).

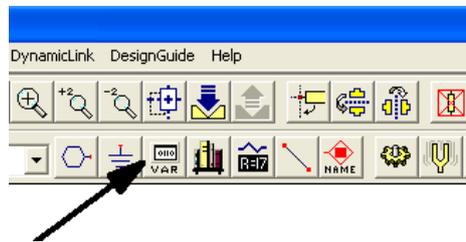


Figura 1.12: Inserimento delle variabili

Il valore di inizializzazione delle variabili non è importante per gli scopi di questo esempio, dunque si può lasciare quello predefinito. La finestra principale appare, dopo le modifiche, come in Figura 1.13.

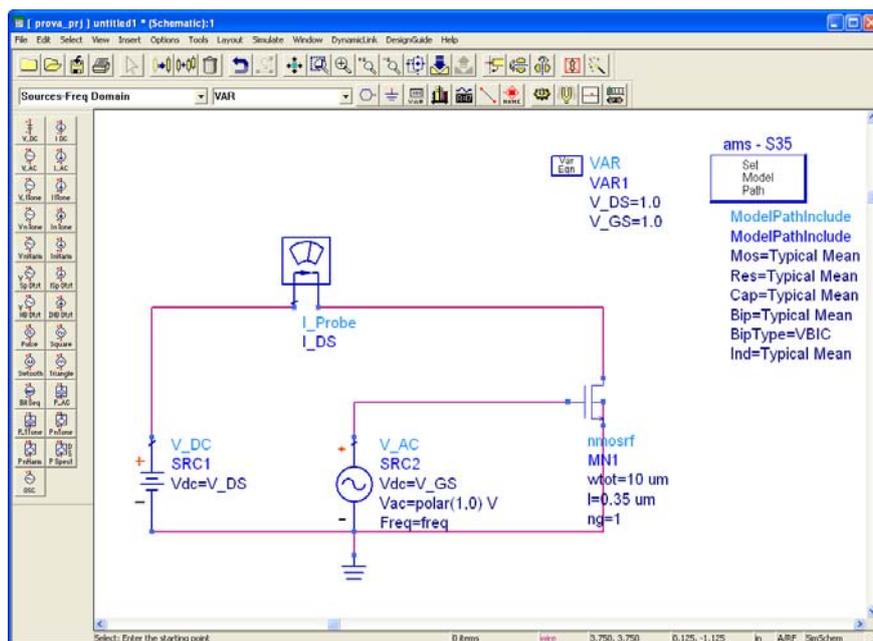


Figura 1.13: Finestra principale

Per impostare le analisi sono necessari due componenti che vanno piazzati nello schematico e che si possono trovare rispettivamente sotto *Simulation-DC* e *Simulation-AC*. Hanno il simbolo che caratterizza tutti i tipi di simulazione: una piccola ruota dentata (Figura 1.14).

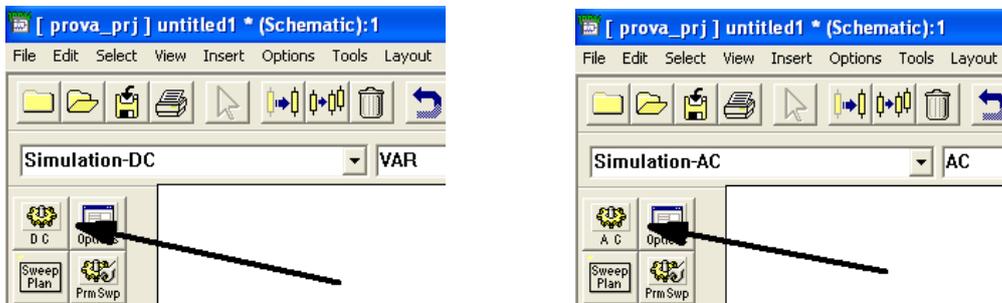


Figura 1.14: Simboli delle simulazioni DC e AC

Il tracciamento delle caratteristiche di uscita del MOSFET richiede che le due variabili V_{DS} e V_{GS} siano modificate in maniera indipendente (I_{DS} in funzione di V_{DS} , con parametro V_{GS}). Di seguito viene illustrato uno dei possibili modi di procedere.

Nella simulazione DC è consentito impostare uno sweep interno su una variabile qualsiasi a scelta del progettista, mentre per la simulazione AC lo sweep dedicato è possibile solo per la frequenza (a cui non si è interessati). Si rende dunque necessario l'uso di un ulteriore componente, che consenta la modifica controllata di una variabile. Lo si può trovare con il nome di *PrmSwp* (*Parameter Sweep*) sotto il menù di una qualsiasi simulazione, come ad esempio quella DC (Figura 1.15).

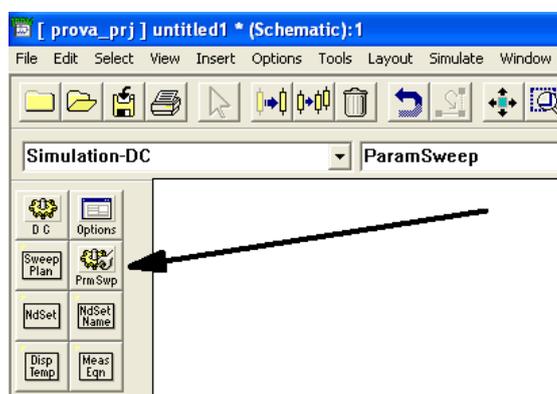


Figura 1.15: Parameter Sweep (Prm Swp)

Avendo a disposizione tutti i componenti, si può impostare la simulazione con un doppio sweep. L'idea è la seguente: si sfrutta un'istanza di *PrmSwp* per la variabile V_{GS} , e la si rende visibile ad entrambe le simulazioni (DC e AC); per l'altra variabile, V_{DS} , si settano due sweep indipendenti e paralleli, uno interno alla simulazione DC (e che vale, dunque, solo per quest'ultima), ed uno collegato solamente alla simulazione AC. Può sembrare un po' macchinoso, ma è il metodo consigliato dagli stessi sviluppatori del software, e consente di ottenere i risultati voluti.

Per impostare quanto illustrato, si entra dunque nelle proprietà della simulazione DC (doppio click), e si ha subito a disposizione il *tab* di interesse. Si inserisce il nome della variabile, si sceglie un tipo di sweep lineare, gli estremi, ed il passo della variazione (Figura 1.16). Il sistema riconosce automaticamente le giuste unità di misura (Volt, in questo caso). Nella finestra delle proprietà della simulazione AC si configura solamente l'analisi frequenziale, che in questo caso è di tipo *Single Point*, a 5.25 GHz (Figura 1.17).

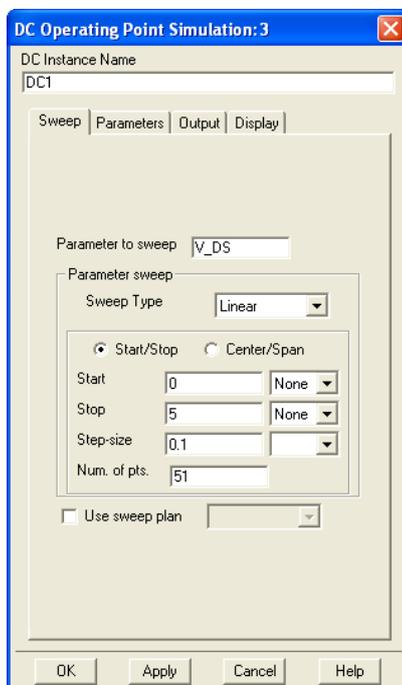


Figura 1.16: Proprietà della simulazione DC

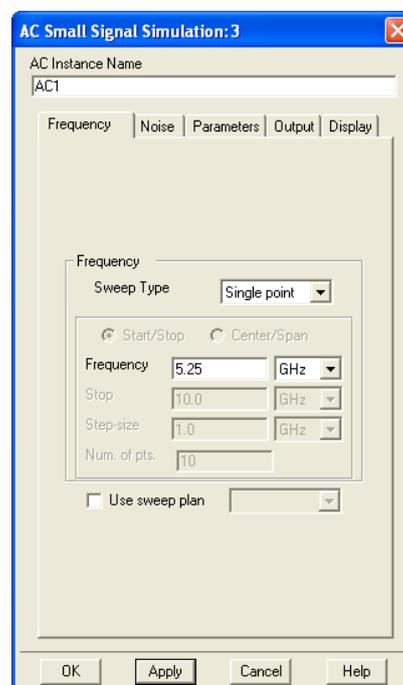


Figura 1.17: Proprietà della simulazione AC

A questo punto è possibile occuparsi del *PrmSwp*. Una volta aperta la finestra dei settaggi, si procede analogamente a quanto visto, impostando i vari parametri (Figura 1.18). In questo caso si effettua un'analisi da 0 a 3 V, con passo 0.5 V. Nel tab successivo (*Simulations*) devono essere inserite, nell'ordine, le simulazioni per le quali vale questo sweep. Va innanzitutto messo il nome dell'istanza relativa alla DC (*DC1*), e, per collegarvi la variazione di V_{GS} , nel secondo campo si pone il nome dell'istanza di un ulteriore *PrmSwp* (per default *Sweep2*), che andrà piazzato nello schematico (Figura 1.18).

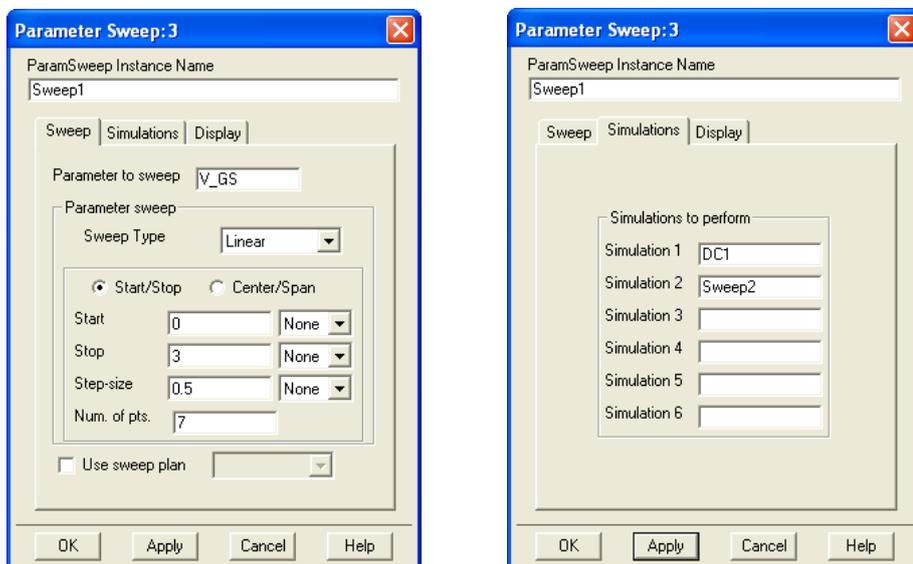


Figura 1.18: Proprietà del primo Parameter Sweep

Quindi, nelle proprietà del nuovo elemento (l'oggetto di tipo *PrmSwp*, nominato *Sweep2*), si vanno ad impostare le grandezze relative alla variazione della tensione drain-source, che sarà valida solamente per l'analisi AC. Questo andrà segnalato al software, tramite l'inserimento del nome dell'istanza *AC1*, nell'apposito tab delle simulazioni (Figura 1.19).

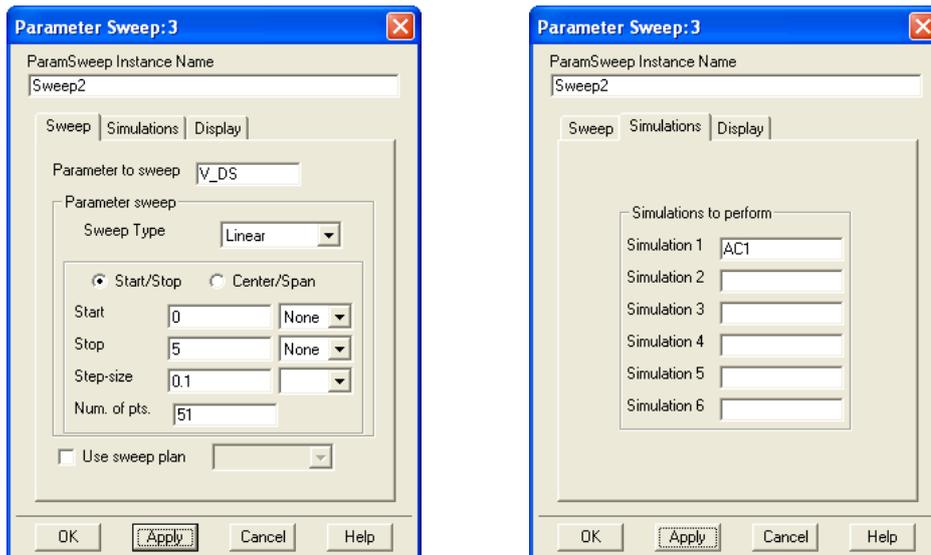


Figura 1.19: Proprietà del secondo Parameter Sweep

Dopo aver preparato lo schematico completo, lo si può salvare (*File* → *Save Design*), ad esempio col nome *prova*. La finestra principale appare dunque nel seguente modo (Figura 1.20):

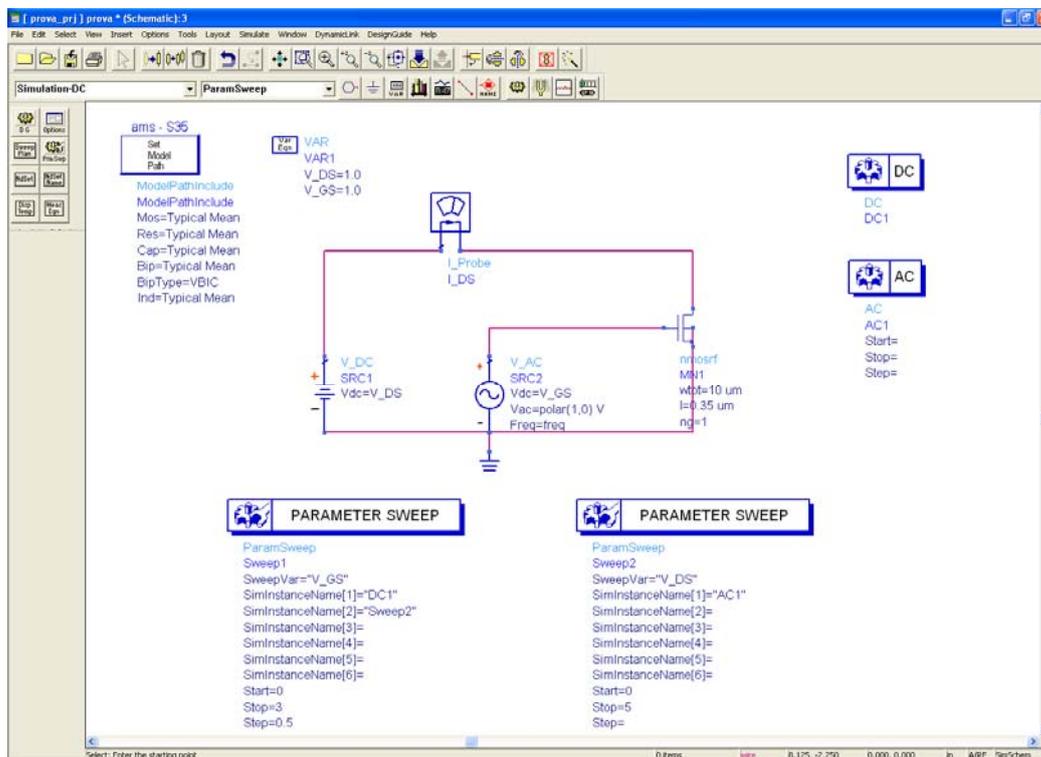


Figura 1.20: Schematico completo

Non rimane che lanciare la simulazione tramite il comando apposito (Figura 1.21).

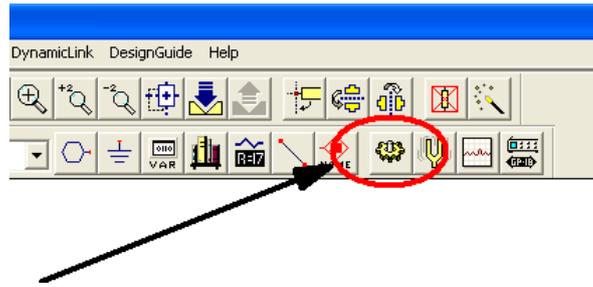


Figura 1.21: Pulsante per l'avvio della simulazione

Si apre una nuova finestra che indica lo stato di avanzamento dell'elaborazione ed eventuali errori riscontrati. Se l'esito è positivo, i risultati vengono scritti all'interno del *dataset*. Tale file prende il nome del relativo schematico, ha estensione *.ds*, e si trova nella sottocartella *Data* del progetto.

Conclusa la simulazione, un'ulteriore finestra (*Data Display*) consente di visualizzare ed analizzare il dataset. In esso è possibile generare grafici rettangolari o polari, liste, carte di Smith, inserire *marker* per leggere specifici valori, equazioni per effettuare, operazioni sui dati, e visualizzare i risultati di tali operazioni. Il foglio di lavoro che viene creato dal progettista può essere salvato per essere riutilizzato successivamente.

Per questo, è sufficiente andare sul menù del Data Display e selezionare *File* → *Save* per salvare il dataset con lo stesso nome del relativo schematico con estensione *.dds*: il dataset associato al Data Display è visualizzato nel menù a tendina presente nella barra degli strumenti, e può essere cambiato semplicemente selezionandone un altro da tale menù. La conseguenza sarà che tutti i grafici e le equazioni verranno aggiornati con le informazioni contenute nel nuovo dataset.

Per graficare le caratteristiche statiche occorre selezionare un oggetto di tipo *Plot* (Figura 1.22).

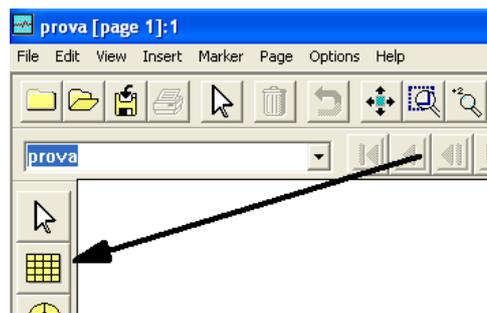


Figura 1.22: Simbolo relativo ai grafici cartesiani

Se ad esempio si volesse verificare l'andamento della corrente in funzione della tensione gate-source e con parametro V_{DS} , basterebbe inserire un nuovo *Plot*, selezionare la I_{DS} , e questa volta cliccare su '>>Add Vs...>>' (*Add Versus*), per scegliere esplicitamente la variabile indipendente (in questo caso $DC.V_{GS}$), come indicato in Figura 1.25. La variabile rimasta è assunta come parametro (V_{DS}).

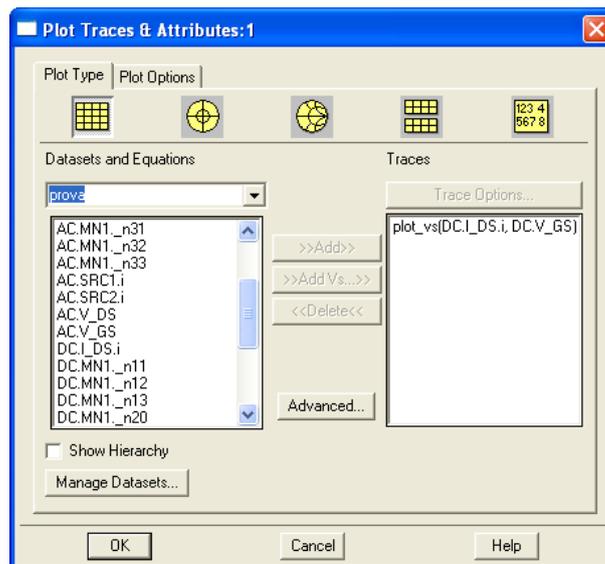


Figura 1.25: Proprietà del grafico

Per tracciare l'andamento della transconduttanza (gm) è necessario considerare i risultati della simulazione AC, e visto che il gm non è disponibile fra i dati primari, si deriva tramite un'espressione. Pertanto, occorre inserire un oggetto di tipo *Equation* che si trova nella barra dei grafici, sul lato sinistro del Data Display (Figura 1.26).

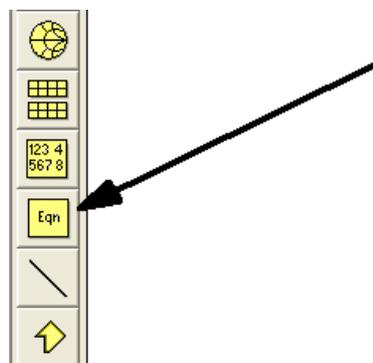


Figura 1.26: Inserimento di un'equazione

Una volta piazzato, occorre scrivere l'equazione desiderata, che in questo caso è $gm = \text{mag}(AC.I_DS.i[0]/(1 V))$. La funzione *mag* restituisce il modulo dell'argomento; l'indice fra parentesi quadre ([0]) sta ad indicare che si è interessati al primo (ed, in questo caso, unico) elemento del vettore costituito dalle sinusoidi alle varie frequenze, impostate nella simulazione AC (single point a 5.25 GHz); il valore al denominatore è lo stesso presente nel generatore di piccolo segnale dello schematico e da cui tutti i risultati dell'analisi AC dipendono.

Se adesso si inserisce un altro grafico, e si cerca nel menù a tendina *Datasets and Equations*, si trova, oltre al *Dataset* relativo alla simulazione (*prova*), anche la voce *Equations*, sotto la quale è presente l'espressione appena scritta (Figura 1.27).

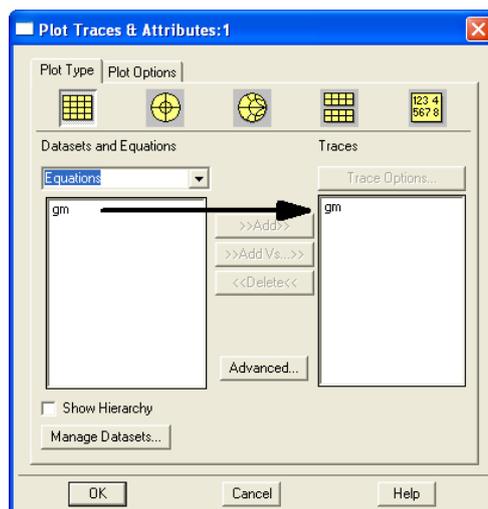


Figura 1.27: Proprietà del grafico

Portandola nel menù dei tracciamenti, e pigiando *OK*, si ottiene infine la transconduttanza in funzione di V_{DS} , parametrizzata per V_{GS} (Figura 1.28).

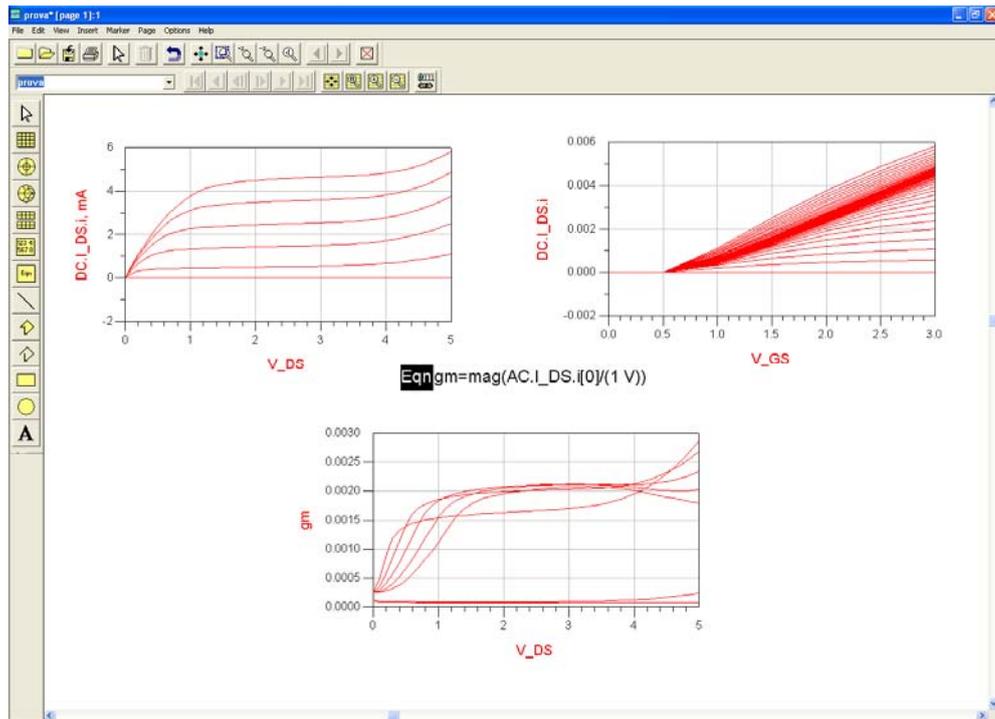


Figura 1.28: Data Display complessivo

1.11 Esempio con transistori bipolari

In questo esempio, si effettueranno le analisi AC e S-Parameter per valutare, alla frequenza di 2.4 GHz, la cifra di rumore, la resistenza di sorgente ottima, il guadagno di corrente alle variazioni (ic/ib) e alcuni parametri relativi al circuito (linearizzato) per piccoli segnali di un transistor bipolare presente nel design kit fornito da AMS (AustriaMicrosystem).

Come nell'esempio precedente, dopo aver avviato il programma di ADS è necessario creare un nuovo progetto. Nel menu della finestra principale bisogna cliccare su *File* → *New Project*, inserire il nome del nuovo progetto, ad esempio *prova*, e settare l'unità di misura di riferimento, ad esempio *micron*. Il progetto consiste in una directory che prende il nome del progetto assegnato seguito da *_prj*. Nel caso in questione la directory si chiama *prova_prj*.

All'interno di un progetto è possibile creare tutti gli schematici ed i layout che si desidera, assegnando ad ognuno di essi un nome. Quando si crea un nuovo progetto esso viene automaticamente aperto e con esso compare automaticamente anche una finestra che rappresenta uno schematico nuovo.

All'interno di tale finestra è possibile inserire tutti gli elementi necessari per realizzare il circuito di test del bipolare.

Per prima cosa, è necessario inserire nello schematico il componente che indica al simulatore in quale libreria sono contenute le model del transistore che si vuole testare. Tale componente si chiama *Set Model Path* e si trova all'interno del sottomenù PRIMLIB, nella tavola dei componenti (*palette components*). All'interno dello stesso sottomenù è possibile trovare ed inserire nello schematico il componente da testare: il transistore bipolare npn 121 (vedi Figura 1.29).

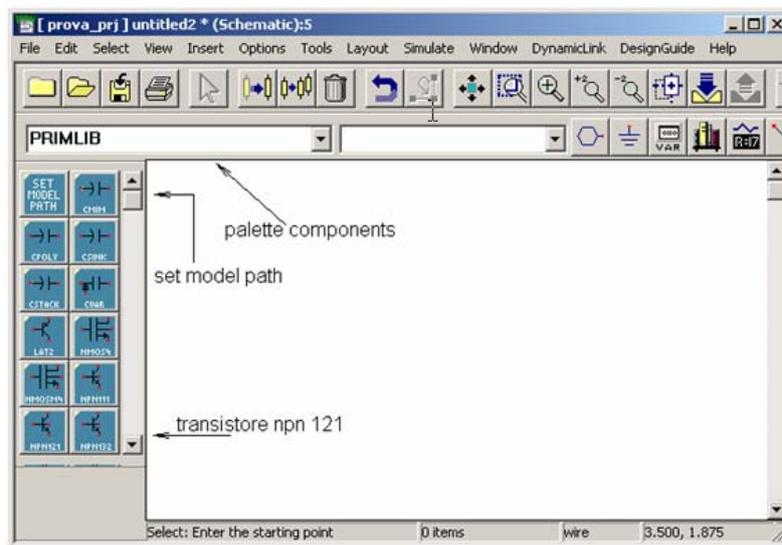


Figura 1.29: Schematico con indicazione della tavola componenti, del set model path e del transistore bipolare

Una volta inserito il transistore bipolare nello schematico, esso apparirà con il suo classico simbolo a tre terminali e in più il terminale di substrato come indicato in Figura 1.30.

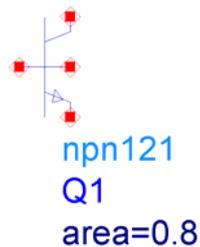


Figura 1.30: Transistore npn 121

Per modificarne i parametri è necessario fare doppio click sul simbolo del transistor. Apparirà la finestra di Figura 1.31. In questa tecnologia, i parametri su cui poter agire sono: i) la lunghezza di emettitore, che nella finestra compare come *area*, e ii) la molteplicità, ovvero il numero di transistori in parallelo. Per indicare il numero (*n*) di transistori in parallelo si usa la sintassi $\langle 1:n \rangle$ nel campo *instance name* (vedi Figura 1.31, accanto a *Q1* va inserito $\langle 1:n \rangle$).

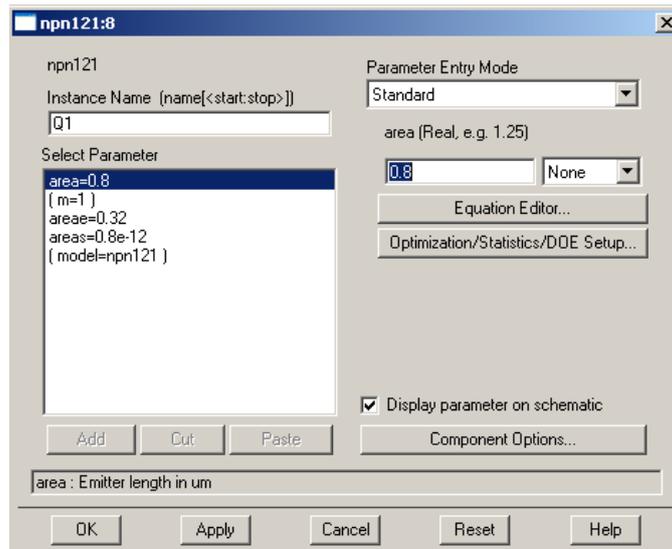


Figura 1.31: Finestra per la modifica dei parametri del transistor

Nel caso in esame la lunghezza di emettitore (*area*) è pari a 12 μm .

A questo punto è necessario costruire il circuito per effettuare le simulazioni. È necessario avere a disposizione i fili di collegamento (*wire*), il riferimento a massa (*ground*) ed anche un componente per dichiarare le variabili da utilizzare nel circuito. Tutti questi componenti si trovano a disposizione nella barra degli strumenti dello schematico (vedi Figura 1.32).

Per la polarizzazione del circuito serve una sorgente di corrente in continua (*I_{DC}*) che si trova nella tavola dei componenti nel sottomenù *Sources-Freq Domain* (vedi Figura 1.32).

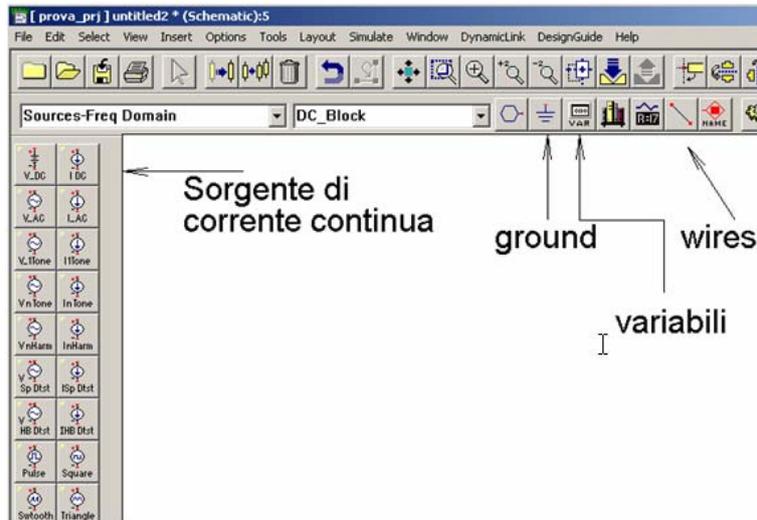


Figura 1.32: Sorgente di corrente continua, riferimento a massa, fili di collegamento e variabili

Servono anche la sorgente di segnale per l'analisi AC e le terminazioni per l'analisi a parametri S. Le terminazioni si trovano all'interno del sottomenù *Simulation-S_param* e prendono il nome di *term*. Il componente necessario per impostare l'analisi ha il simbolo che caratterizza tutti i tipi di simulazione: una piccola ruota dentata (vedi Figura 1.33).

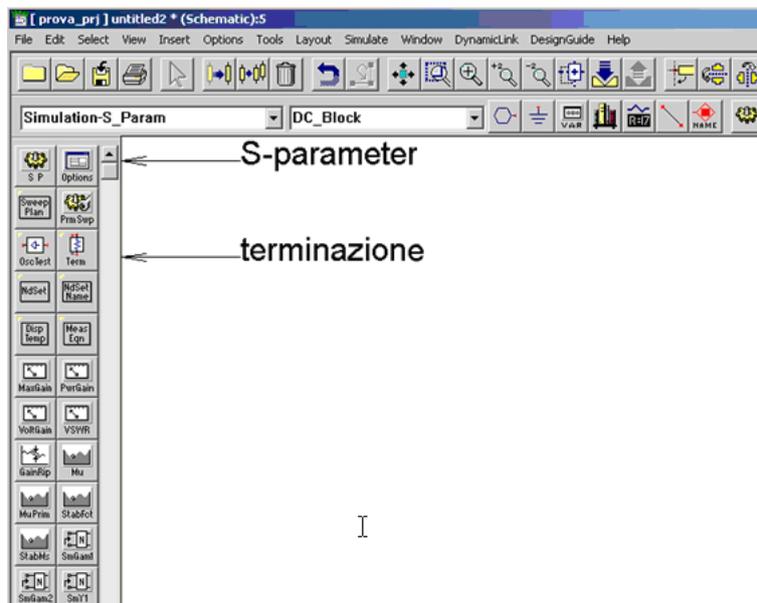


Figura 1.33: Terminazioni e componente per settare l'analisi a parametri S

P_ITone è una sorgente di potenza disponibile adatta anche per le simulazioni AC (viene interpretata come semplice terminazione per un'analisi a

parametri S) e si trova nella tavola dei componenti nel sottomenù *Sources-Freq Domain*.

Le resistenze, le induttanze e le capacità (generiche, pertanto non relative al design-kit di AMS) si trovano nella tavola dei componenti, nel sottomenù *Lumped-Components*. Le capacità e le induttanze utilizzate nel circuito sono ideali e non rumorose (*DC_Feed*, *DC_Block*) dal momento che si vuole caratterizzare il solo transistor (vedi Figura 1.34).

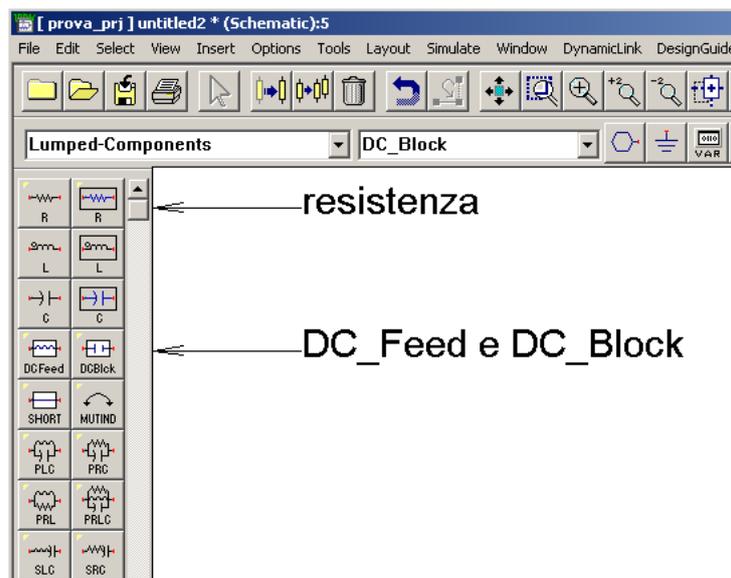


Figura 1.34: Sottomenù dei componenti discreti (*Lumped Components*)

Per valutare le correnti nei rami di interesse è necessario inserire delle probe: nella analisi AC si trovano nel sottomenù della tavola dei componenti *Probe-Components* e prendono il nome di *Current-Probe*, in accordo a quanto detto in precedenza.

Per settare le analisi da svolgere (AC e S-Parameter) è necessario inserire nello schematico le due ruote dentate; relativamente all'analisi AC, questa si trova nella tavola dei componenti nel sottomenù *Simulation-AC* (vedi Figura 1.35). Inoltre, dal momento che l'obiettivo è caratterizzare il transistor alla frequenza di 2.4 GHz al variare della corrente di polarizzazione, è necessario inserire nello schematico un *Parameter Sweep* e si trova all'interno di tutti i sottomenù delle simulazioni già incontrato e riportato per comodità in Figura 1.35 seguente.

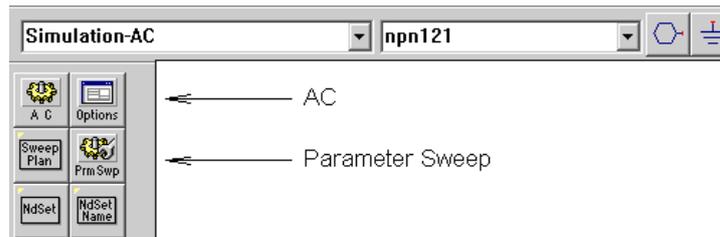


Figura 1.35: Componente per effettuare gli “sweep” e per settare l’analisi AC

A questo punto c’è tutto per costruire il circuito da simulare e riportato in Figura 1.36 seguente.

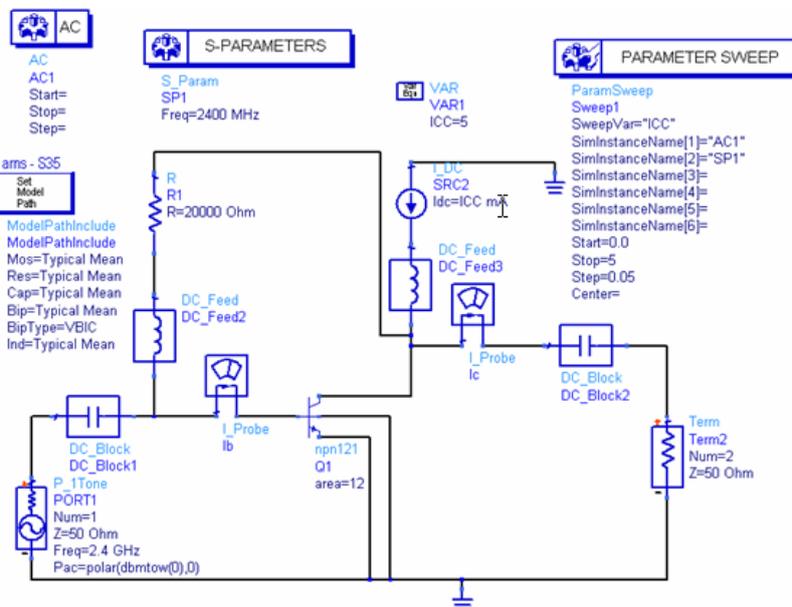


Figura 1.36 : Circuito di test definitivo

Una volta realizzato il circuito, per salvarlo è sufficiente selezionare nel menu dello schematico *File* → *Save Design As...* e digitare il nome, ad esempio *test_S_AC*. Gli schematici e i layout vengono salvati nella directory *networks* che si trova all’interno della directory principale del progetto *prova_prj* ed hanno estensione *.dsn*.

Il circuito di polarizzazione è un semplice collettore-base con resistenza di 20 KΩ. La sorgente di corrente in continua (*ICC*) è stata parametrizzata e viene fatta scorrere da 0 a 5 mA con un passo di 0.05 mA, come indicato all’interno del *Parameter Sweep*; qui sono inoltre elencate le simulazioni che devono

essere eseguite per questo “sweep” di *ICC*. In questo caso sono indicate sia la AC sia la S-parameter, inserendo nell'apposito campo i nomi delle relative istanze che sono *AC1* e *SP1*. In Figura 1.9 è visualizzata la finestra del *Parameter Sweep* con tutti i passi da seguire per impostare lo sweep appena descritto.

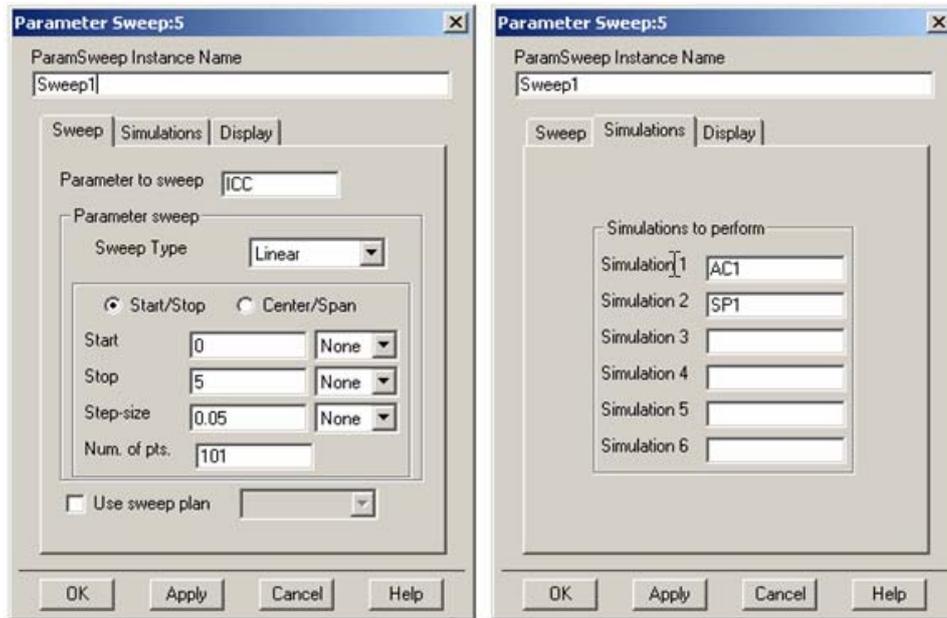


Figura 1.37: Finestra del *Parameter Sweep*

Alle variazioni, la sorgente di corrente continua è un circuito aperto, mentre la resistenza è staccata perché in serie ad essa vi è un *DC_Feed*. In questo modo la sorgente *P_ITone* entra direttamente nella base del transistor in configurazione common emitter con il carico di 50 Ω posto sul collettore.

Occorre inoltre settare le simulazioni: facendo doppio click su di esse, si apre una finestra divisa in diversi sottomenù all'interno dei quali si possono assegnare i valori corretti ai vari parametri, come evidenziato in Figura 1.38 relativamente all'analisi a parametri S.

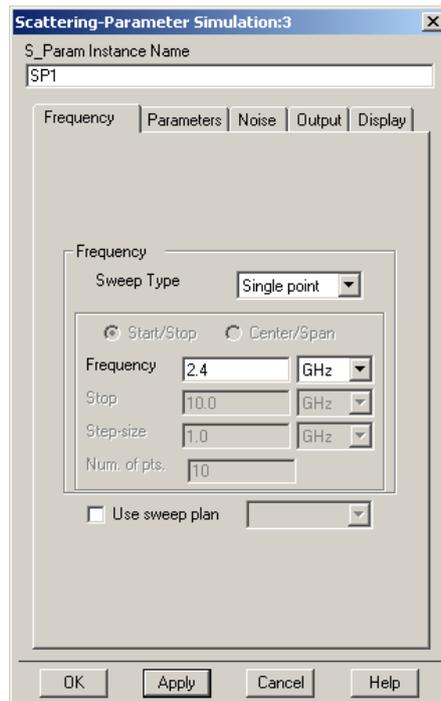


Figura 1.38: Finestra per il settaggio della simulazione a parametri S

Il primo sottomenù prende il nome di *Frequency* ed è presente anche nella finestra relativa alla simulazione AC. In entrambe le finestre è necessario selezionare *Single point* nel campo *Sweep Type* il che sta ad indicare che le due analisi vengono compiute in un singolo punto frequenziale. Nel campo *Frequency* va poi inserita la frequenza desiderata (nell'esempio in questione è 2.4 GHz). Nella finestra relativa alla simulazione S-parameters è necessario settare anche altri parametri. Nel sottomenù *Noise* va selezionato *Calculate Noise* per consentire il calcolo della cifra di rumore minima (NFmin) ed effettiva del circuito. Nel sottomenù *Parameters* è possibile scegliere quali e quanti dati della simulazione memorizzare nel *dataset*. È possibile scegliere di memorizzare, oltre ai parametri S, anche i parametri Z e Y, ed inoltre è presente il campo *Device Operating point level* che consente di scegliere quante informazioni, relative al circuito, scrivere nel dataset. Selezionando *Detailed*, si potranno trovare tutte le correnti, le tensioni e i parametri linearizzati attorno al punto di riposo dei dispositivi non lineari (in questo caso il transistor bipolare).

Per impostare le caratteristiche della sorgente *P_tone* si apre la relativa finestra (doppio click) in cui è possibile inserire i vari parametri. L'impedenza di sorgente Z in questo caso è fissata a 50 Ω. Il numero della porta *Num* è

necessario alla simulazione a parametri S in quanto tali parametri vengono generati in funzione di tale numero; relativamente al caso in questione, essendo la porta di ingresso, si fissa il numero della porta pari ad 1. La frequenza *Freq* è ignorata nel caso delle simulazioni che si intende effettuare. *Pac* è la potenza espressa in dBm della sorgente. È utilizzata solo dalla simulazione AC. Comunque sia, essendo tale analisi lineare, il livello di potenza del segnale è poco importante (a patto di averne memoria), dal momento che entrambe le analisi operano sul circuito linearizzato. L'analisi a parametri S considererà tale sorgente una *terminazione* a 50 Ω, come quella posta in uscita. In quest'ultima il campo *Num* viene fissato a 2. Nella Figura 1.39 è visualizzata la finestra per impostare la sorgente *P_1Tone*.

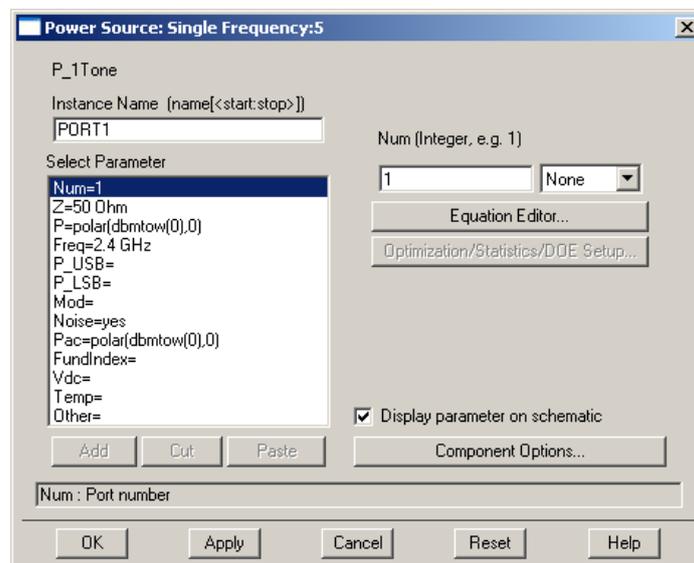


Figura 1.39: Finestra relativa alla sorgente di potenza disponibile *P_1Tone*

Infine, le sonde di corrente sono state chiamate *Ib* e *Ic* per identificare rispettivamente le correnti totali di base e di collettore. Queste ultime saranno considerate solo dall'analisi AC in quanto l'analisi S per estrarre i parametri S calcola solo le tensioni e le correnti sulle porte.

A questo punto è possibile lanciare le due simulazioni selezionando dal menu dello schematico *Simulate* → *Simulate*. Si apre una nuova finestra che indica lo stato della simulazione ed eventuali errori riscontrati. Se la simulazione ha esito positivo, i risultati vengono scritti all'interno del dataset. Come detto in

precedenza, tale file prende il nome del relativo schematico, ha estensione *.ds* e si trova all'interno della sottocartella *Data* del progetto.

A questo punto si apre automaticamente una finestra con lo stesso nome dello schematico. Si tratta del *Data Display* che consente di visualizzare e analizzare il dataset. Il foglio di lavoro che viene creato dal progettista può essere salvato per riutilizzarlo nelle successive simulazioni. Per questo, è sufficiente andare sul menu del Data Display e selezionare *File* → *Save* per salvare il file (con estensione *.dds*) con lo stesso nome del relativo schematico all'interno della directory principale del progetto. Il dataset associato al Data Display è visualizzato nel menu a finestra presente nella barra degli strumenti. È possibile cambiare il dataset semplicemente selezionandone un altro da tale menu. La conseguenza sarà che tutti i grafici e le equazioni verranno aggiornate con le informazioni contenute nel nuovo dataset. In Figura 1.40 è riportata la finestra del Data Display.

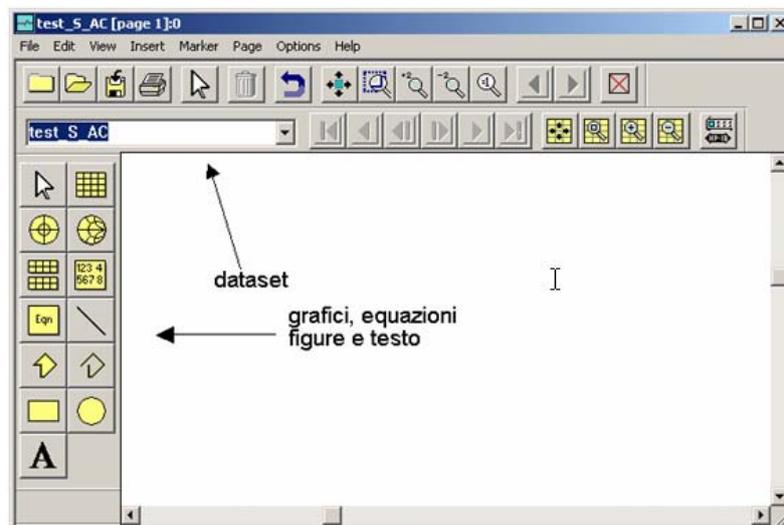


Figura 1.40: Finestra relativa al data display

Nella prova in questione si ha come primo obiettivo quello di visualizzare la cifra di rumore minima in funzione della corrente di polarizzazione (ICC). Per questo, è bene usare un grafico cartesiano (in Figura 1.40 è quello in alto a destra nella barra a lato relativa a grafici, equazioni, figure e testo): è necessario selezionarlo con il mouse e posizionarlo sul foglio di lavoro. Si aprirà una finestra che si chiama *Plot Traces & Attributes* nella quale si può scegliere cosa visualizzare nel grafico (vedi Figura 1.41).

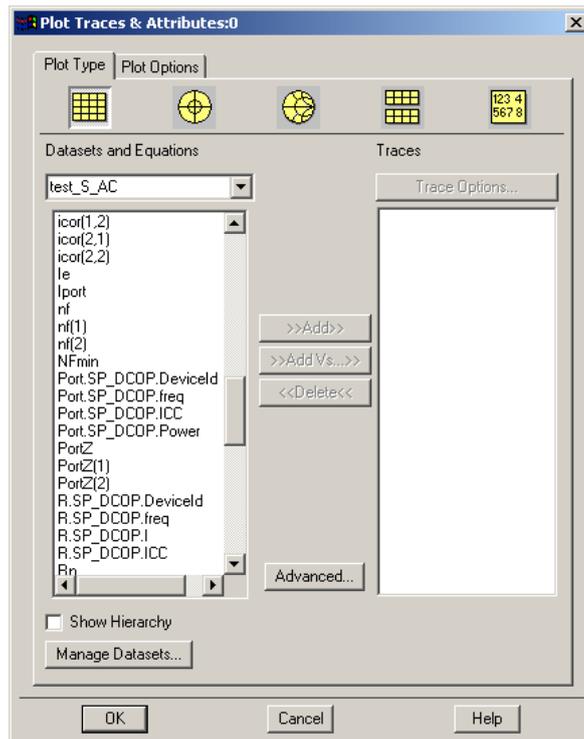


Figura 1.41: Plot Traces & Attributes:
finestra per le impostazioni di un grafico

Questa finestra viene visualizzata nel momento in cui viene inserito un qualunque tipo di grafico. Nella colonna a sinistra sono disponibili tutte le informazioni presenti nel dataset *test_S_AC.ds*. La cifra di rumore minima prende il nome di *NFmin* come si vede al centro della lista nella figura. È necessario pertanto selezionarla e premere il tasto '>>Add>>' presente al centro della finestra; *NFmin* comparirà nella colonna a destra. Volendo, si possono aggiungere altre informazioni nello stesso grafico (non è il nostro obiettivo). Prima di selezionare OK è importante fare un altro passo. Infatti le informazioni presenti nel dataset sono funzione delle *variabili* utilizzate nel processo di simulazione: in particolare nel caso in questione *NFmin* è un'informazione relativa all'analisi a parametri S che è stata condotta su un *singolo punto frequenziale* e per 101 valori di *corrente di collettore* (da 0 a 5 mA con un passo di 0.05 mA), per cui risulta essere funzione di queste due variabili. *NFmin* può essere considerata come una matrice di informazioni con due indici: il primo fa riferimento alla corrente di collettore *ICC*, il secondo alla frequenza *freq*. La dipendenza delle informazioni dalle variabili è visualizzabile sempre da *Plot & Traces Attributes* cliccando su *Trace Options*. Così facendo, si apre una finestra

suddivisa in quattro sottomenù: cliccare su *Trace Expression* e quindi su *Variable Info*. A questo punto, si apre un'altra finestra dal nome *Browse Data* dove è possibile vedere la dipendenza di ciascun dato dalle variabili (vedi Figura 1.42).

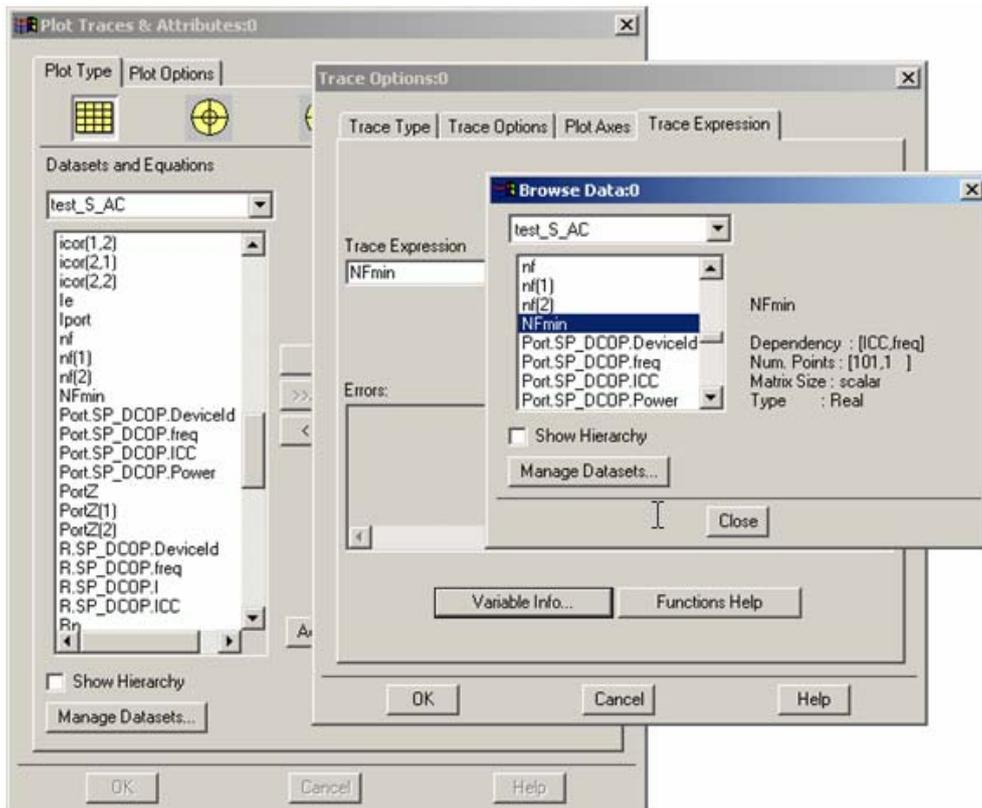


Figura 1.42: Trace Options e Browse Data: finestre per l'impostazione dei grafici

Per graficare *NFmin* in funzione di *ICC* è necessario modificare il campo *Trace Expression* all'interno della finestra *Trace Options* indicando *NFmin[:,0]*. Con l'indice '0' si seleziona la variabile *freq* (in questo caso ha un solo valore, 2.4 GHz) mentre con '::' si indica di considerare tutte le correnti *ICC* simulate. È possibile semplificare la sintassi indicando *NFmin[0]*, in quanto se viene indicato un solo indice esso viene associato alla variabile presente all'estrema destra nel *Browse Data*. A questo punto è sufficiente cliccare su OK e il grafico appare nel *Data Display* come visualizzato in Figura 1.43.

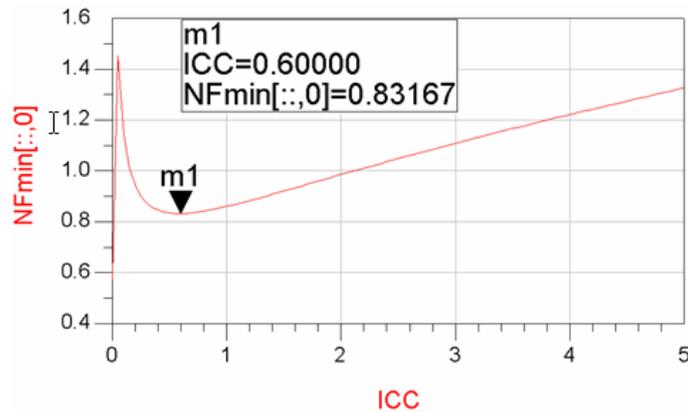


Figura 1.43: NF minima in funzione di ICC

La NF_{min} è espressa già in dB. Se si vuole mettere in evidenza un particolare valore del grafico è possibile inserire un marker. I marker si inseriscono selezionando *Marker* → *New* nel menu del Data Display e trascinando il marker sul punto del grafico che interessa. In questo modo si può ad esempio mettere in evidenza il punto in cui la cifra di rumore minima del transistor ha il suo valore minimo che risulta pari a 0.83 dB in corrispondenza di una corrente di 600 μ A (vedi figura sopra).

Per visualizzare la resistenza di sorgente ottima (R_{sopt}) è necessario far ricorso alle equazioni. Infatti nel dataset è presente solo il coefficiente di riflessione ottimo (Γ_{opt}) S_{opt} . Per ricavare la resistenza di sorgente ottima è presente una funzione predefinita di ADS denominata z_{opt} , che ha la seguente sintassi: $y=z_{opt}(S_{opt}, Z_{ref})$ dove Z_{ref} è l'impedenza della porta di ingresso. Come visto nell'esempio relativo al caso dei transistori MOS, per scrivere una equazione è sufficiente prelevarla e piazzarla nel foglio di lavoro del Data Display. Si apre una finestra nella quale inserire l'equazione $Z_{ottima}=z_{opt}(S_{opt}, 50)$ (vedi Figura 1.44).

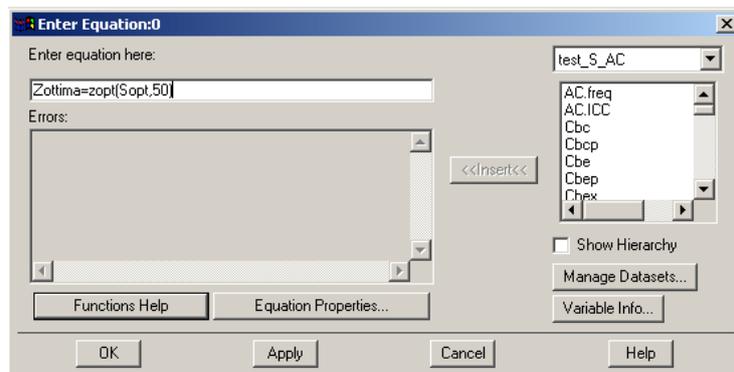


Figura 1.44: Finestra per l'inserimento delle equazioni

Zottima è l'impedenza ottima di sorgente per ottenere la cifra di rumore minima vista in precedenza (Fig.1.43). Essa ha quindi una parte reale e una immaginaria e dipende dalla *ICC* e dalla frequenza, così come *NFmin*.

Per visualizzare la parte reale in un grafico rettangolare bisogna ripetere i passi visti per la *NFmin*. Una differenza sostanziale sta nel fatto che per prelevare le equazioni è necessario scorrere il menu *dataset and equation* nella finestra *Plot & Traces Attributes* e selezionare *equation*. Una volta selezionato *Zottima* e cliccato su '>>Add >>', si decide se visualizzare *Zottima* in dB, in dBm, Magnitude, Real, Imaginary o Phase (nel nostro caso: Real). Inoltre, dal momento che si vuole *Rsopt* in funzione di *ICC*, occorre ripetere i passi visti nel caso della *NFmin*. La resistenza di sorgente è visualizzata in Figura 1.45.

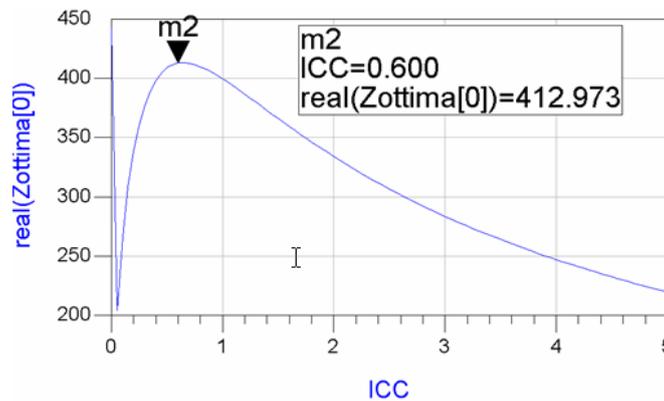


Figura 1.45: *Rsopt* in funzione di *ICC*

In corrispondenza della corrente di collettore ottima pari a 600 μ A si ottiene una resistenza di sorgente ottima pari a 413 Ω .

A questo punto ci sono tutti gli strumenti per visualizzare parametri S, Z e Y. Di seguito si focalizza l'attenzione sull'estrazione dei parametri linearizzati attorno al punto di riposo del transistor. Il simulatore li preleva all'interno delle model, li attualizza rispetto al punto di riposo e li inserisce nel dataset. Per visualizzarli è possibile seguire la procedura precedentemente vista per *Rsopt* e *NFmin*. Anch'essi dipendono dall'unica frequenza in esame e dalla corrente di polarizzazione *ICC*. Nel caso in cui si vogliono visualizzare all'interno di una lista, non è strettamente necessario indicare [0] per fissare la variabile *freq*. In questo caso il risultato sarà quello di Figura 1.46, dove ad esempio è riportata la

transconduttanza (gm), che nel dataset prende il nome di $dI_{cc_dV_{bei}}$ (in accordo a quanto riportato nel modello VBIC del transistor bipolare).

dlcc_dVbei	
ICC=0.000, freq=2.400GHz	3.403E-16
ICC=0.050, freq=2.400GHz	0.002
ICC=0.100, freq=2.400GHz	0.004
ICC=0.150, freq=2.400GHz	0.006
ICC=0.200, freq=2.400GHz	0.007
ICC=0.250, freq=2.400GHz	0.009
ICC=0.300, freq=2.400GHz	0.011
ICC=0.350, freq=2.400GHz	

Figura 1.46: Transconduttanza del transistor sotto esame

Per visualizzare il guadagno di corrente alle variazioni (ic/ib) è necessario prima calcolarlo con una equazione che esprima il rapporto tra corrente di collettore e corrente di base risultanti dalla simulazione AC. Per questo sono state poste le *sonde di corrente* in serie alla base e sul carico. Nel nostro caso avendo chiamato le probe rispettivamente I_b e I_c , nel dataset le correnti saranno identificate rispettivamente dai simboli $I_{b.i}$ e $I_{c.i}$. L'equazione che scriviamo è la seguente: $H_{fe} = mag(I_{c.i}/I_{b.i})$. La funzione predefinita mag sta ad indicare il valore assoluto dell'argomento inserito tra parentesi. L'equazione H_{fe} sarà dipendente da ICC e $freq$ così come lo sono $I_{b.i}$ e $I_{c.i}$. Per graficarla rispetto alla corrente ICC è necessario eseguire gli stessi passi precedentemente descritti per visualizzare la R_{sopt} ; il risultato è riportato in Figura 1.47 seguente.

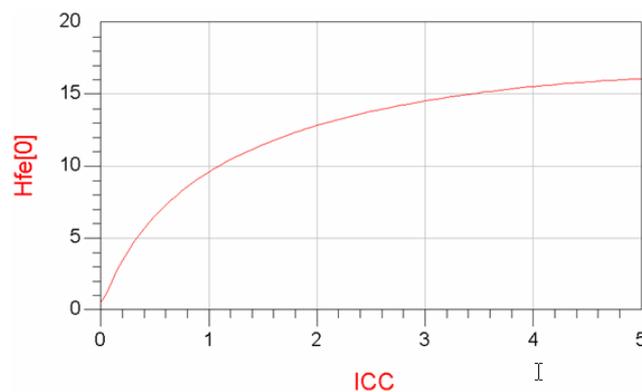


Figura 1.47: Guadagno di corrente alle variazioni