



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE, INFORMATICA E STATISTICA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA ELETTRONICA

Progetto Circuiti Integrati

Giuseppe Loccia Pierpaolo Granello

ANNO ACCADEMICO 2017-2018

1. INTRODUZIONE

Lo scopo di questo lavoro è di andare ad indagare in che modo i mismatch in una tecnologia CMOS a 40 nm influiscano sulle prestazioni di due topologie di CMFB applicate ad un amplificatore operazionale fully differential.

In particolare, una struttura presenterà un CMFB basato su coppia differenziale e l'altra invece presenterà un CMFB basato su specchio di corrente degenerato da transistor che lavorano nella zona di triodo.

Nel realizzare l'amplificatore operazionale, la specifica imponeva di realizzare due strutture: una che guadagnasse 46 dB ed un'altra che guadagnasse 66 dB, entrambe con una frequenza di transizione maggiore a 350 MHz quando fossero chiuse su di un carico di 500 fF.

Per tutti i quattro circuiti realizzati è stata effettuata un'analisi di piccolo segnale per il modo differenziale, un'analisi di piccolo segnale per il modo comune ed è stata tracciata la transcaratteristica applicando una tensione in ingresso statica differenziale.

Per tutte le topologie circuitali inoltre sono state ripetute le analisi di modo comune e di modo differenziale andando a variare le caratteristiche di processo dei transistor per vedere come sarebbero variate le prestazioni di modo comune e di modo differenziale.

Poi, per confrontare le prestazioni sotto mismatch delle due topologie di CMFB, è stato considerato l'amplificatore operazionale con guadagno pari a 46 dB ed è stata effettuata un'analisi montecarlo. Infine, per uno dei quattro circuiti è stato realizzato il layout e, dopo aver effettuato l'estrazione delle parassite, è stato effettuato il confronto tra il circuito ideale ed il circuito contenente le parassite introdotte tramite il layout.

2. OPA con guadagno 46 dB

Per realizzare l'amplificatore è stato scelto di utilizzare un circuito folded cascode con coppia differenziale in ingresso, come quello rappresentato in figura 1.

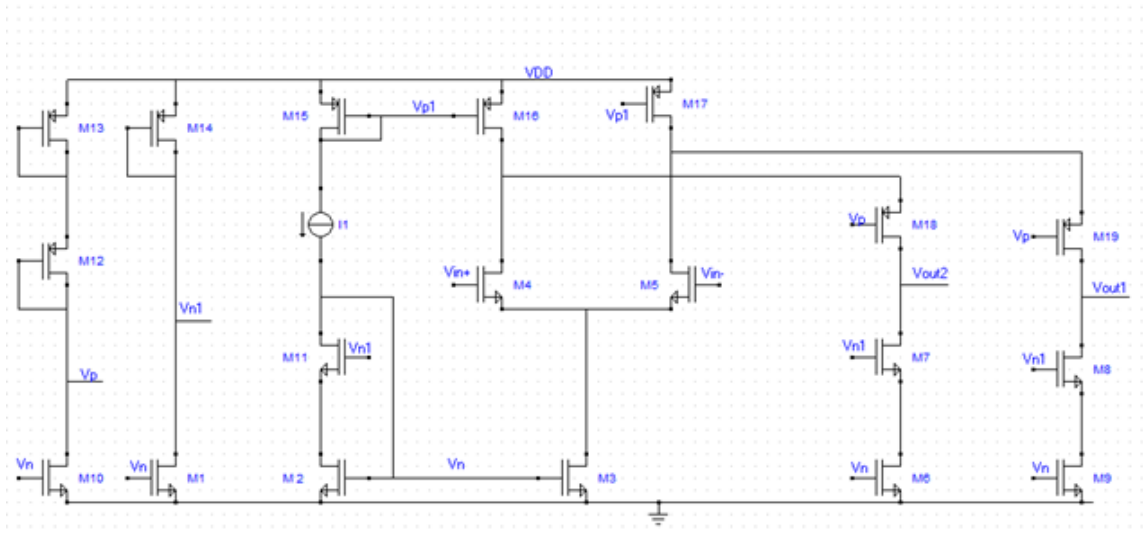


Figure 1 - OPA fully differential

Nell'effettuare il dimensionamento è stato scelto di alimentare il circuito con una tensione VDD pari a 1.2 V e quindi di avere in ingresso ed in uscita una tensione statica di 0.6 V.

Sul ramo di polarizzazione formato dai transistor 2-11-15 è stata imposta una corrente di 50 μA e tramite degli specchi di corrente sono stati polarizzati tutti i restanti rami del circuito.

La coppia differenziale viene alimentata tramite il transistor 3 che impone una corrente pari a 212 μA . I transistor 6 e 9 invece impongono una corrente sui rami di uscita pari a 36 μA .

I rami formati dai transistor 10-12-13 e 1-14 servono per realizzare le tensioni V_{n1} e V_p che andranno ad alimentare i transistor dei rami cascode. In particolare, è stato scelto di porre V_p pari a 370 mV e V_{n1} pari a 850 mV.

Sui drain della coppia differenziale d'ingresso è stato scelto di avere 956 mV.

Nella seguente tabella vengono riassunte tutte le dimensioni dei vari transistor di figura 1 e le correnti annesse:

Tansistor	W [μm]	L [μm]	I [μA]	Tansistor	W [μm]	L [μm]	I [μA]
M10	2.4	0.12	59.4	M15	2.88	0.08	50
M12	10.8	0.04	59.4	M3	12.6	0.16	212.6
M13	10.8	0.04	59.4	M4-M5	12	0.12	106.3
M1	0.24	0.12	10.34	M16-17	8.4x2	0.16	142.66
M14	6.84x2	0.04	10.34	M6-M9	2.16	0.24	36.36
M2	2.16	0.12	50	M7-8	1.92	0.2	36.36
M11	1.2	0.04	50	M18-M19	6	0.2	36.36

Il CMFB basato su coppia differenziale è stato realizzato inizialmente utilizzando una doppia coppia differenziale di tipo n, collegando in modo opportuno i terminali di drain ed andando a chiudere con un carico a specchio come mostrato in figura 2.

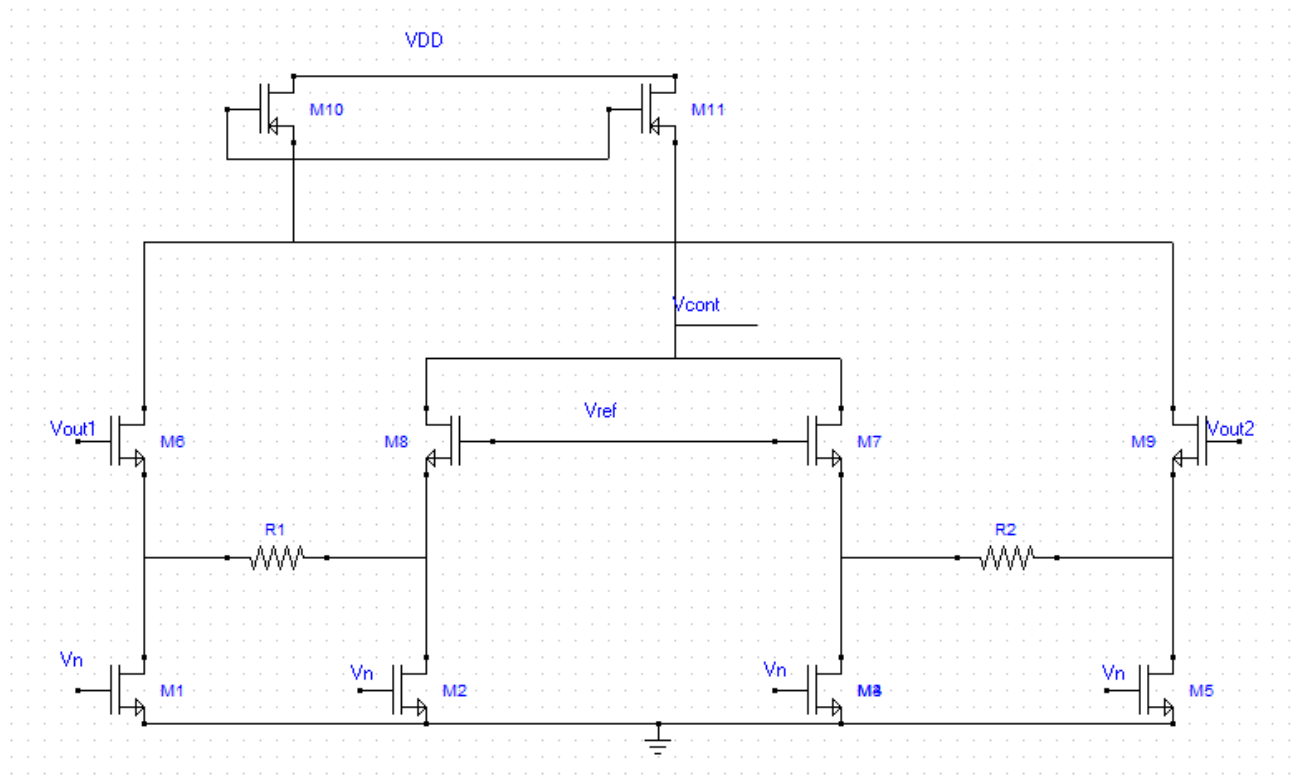


Figure 2- CMFB con coppia n

La tensione di uscita V_{cont} , che in statica è stata posta pari a 559 mV, va a pilotare i gate dei transistor 6-9 in figura 1. Per migliorare la linearità ed aumentare la dinamica del CMFB è stato scelto di degenerare le coppie differenziali con una resistenza di 400 Ω . La tensione di riferimento è stata imposta pari a 600 mV. I transistor 1-2-4-5 forniscono una corrente pari a 14.8 μA .

Nella seguente tabella vengono riassunte tutte le dimensioni dei vari transistor di figura 2 e le correnti annesse:

Tansistor	W [μm]	L [μm]	I [μA]
M1-M2-M4-M5	0.72	0.04	14.8
M6-M8-M7-M9	1.68	0.24	14.8
M10-M11	1.2	0.12	29.6

Problema di questa configurazione di CMFB è che nel momento in cui la tensione di uscita dell’OPA va a diminuire porta a spegnere il transistor a cui è collegato e quindi fa stimare in modo errato il modo comune di uscita. Per risolvere questo problema è stato pensato di ‘accoppiare’ a questo CMFB un altro CMFB duale (Figura 3), basato su coppie p, collegando insieme i nodi che forniscono la tensione di controllo, in modo che anche se in entrambe le configurazioni un transistor si spegne (quello che vede salire la tensione nel CMFB pMOS e quello che la vede scendere nel CMFB nMOS), quello che resta acceso viene ‘compensato’ dal transistor dell’altra configurazione, in maniera che la corrente complessiva al nodo di controllo non vari e quindi non vari la tensione di controllo.

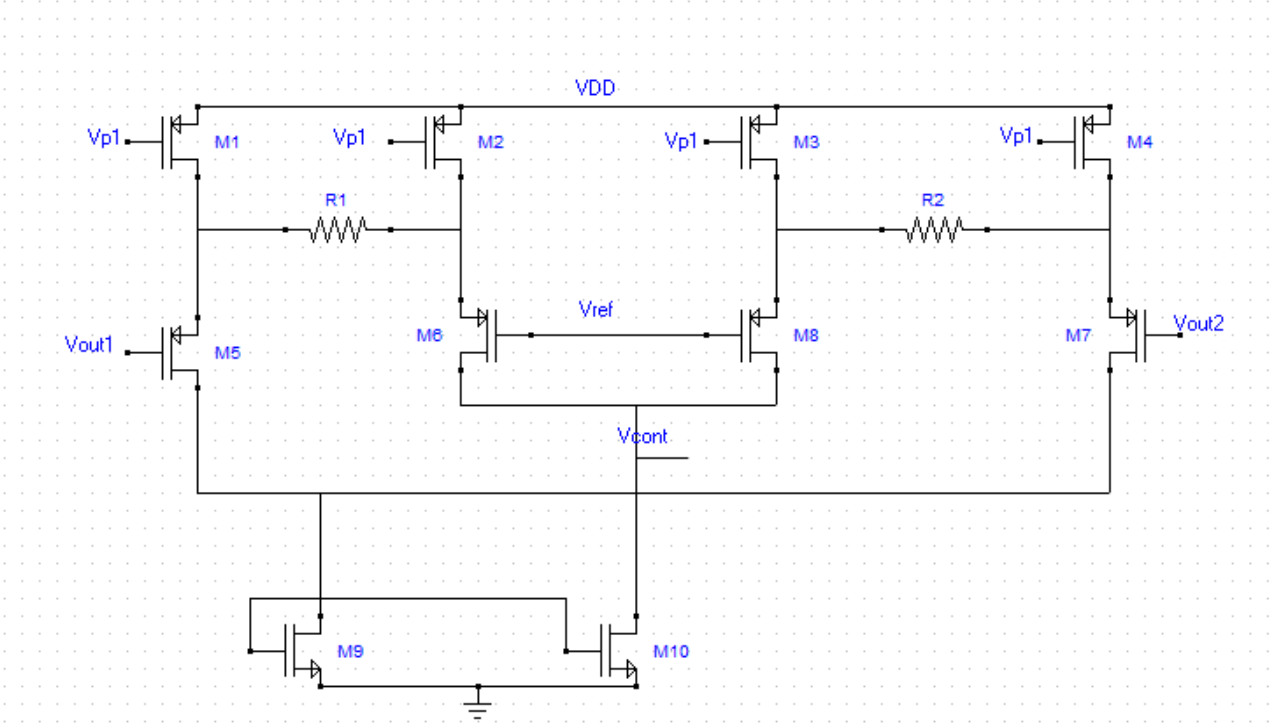


Figure 3- CMFB coppia p

In questo caso è stato scelto di pilotare ogni transistor con una corrente di 11 μA .

Nella seguente tabella vengono riassunte tutte le dimensioni dei vari transistor di figura 3 e le correnti annesse:

Tansistor	W [μm]	L [μm]	I [μA]
M1-M2-M3-M4	0.6	0.04	10.9
M6-M8-M7-M9	12	0.28	10.9
M10-M11	1.08	0.24	21.8

Effettuando l’analisi di piccolo segnale per il modo differenziale per questo circuito si ottiene il seguente andamento per il guadagno.

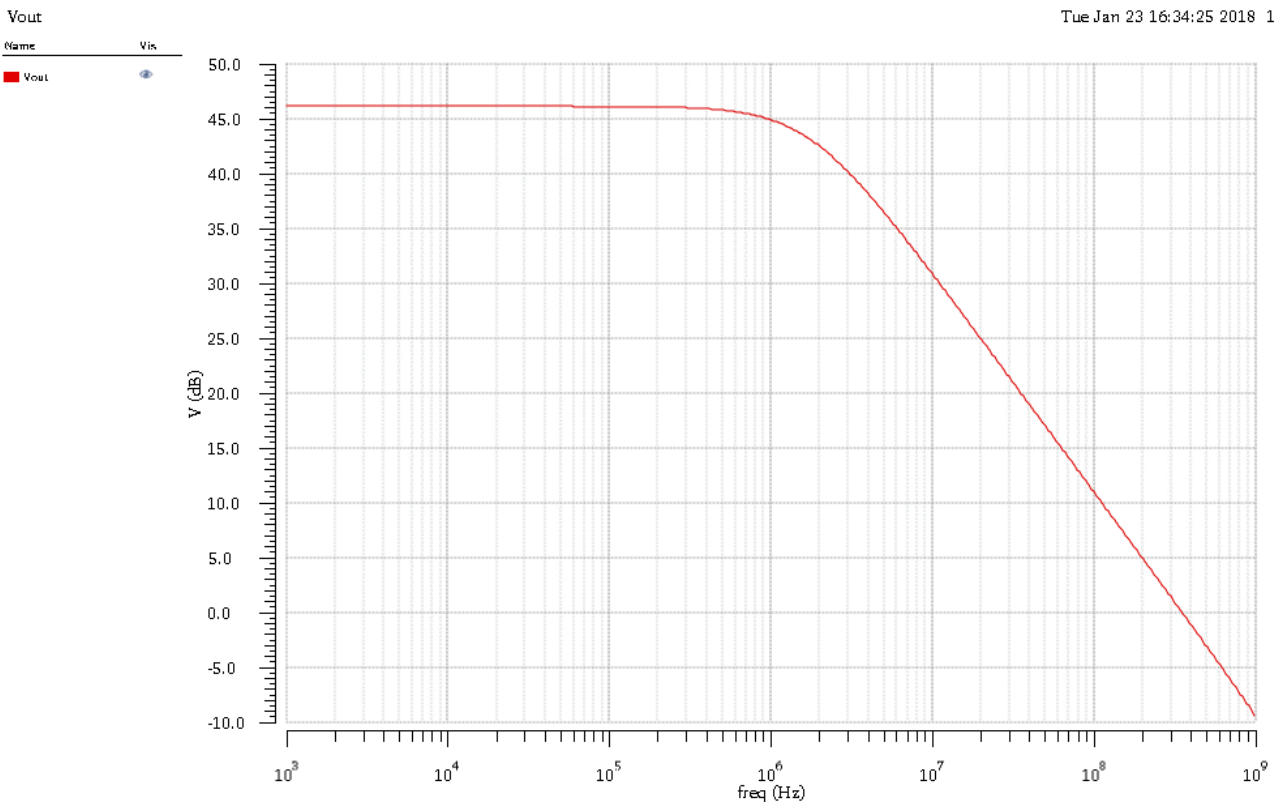
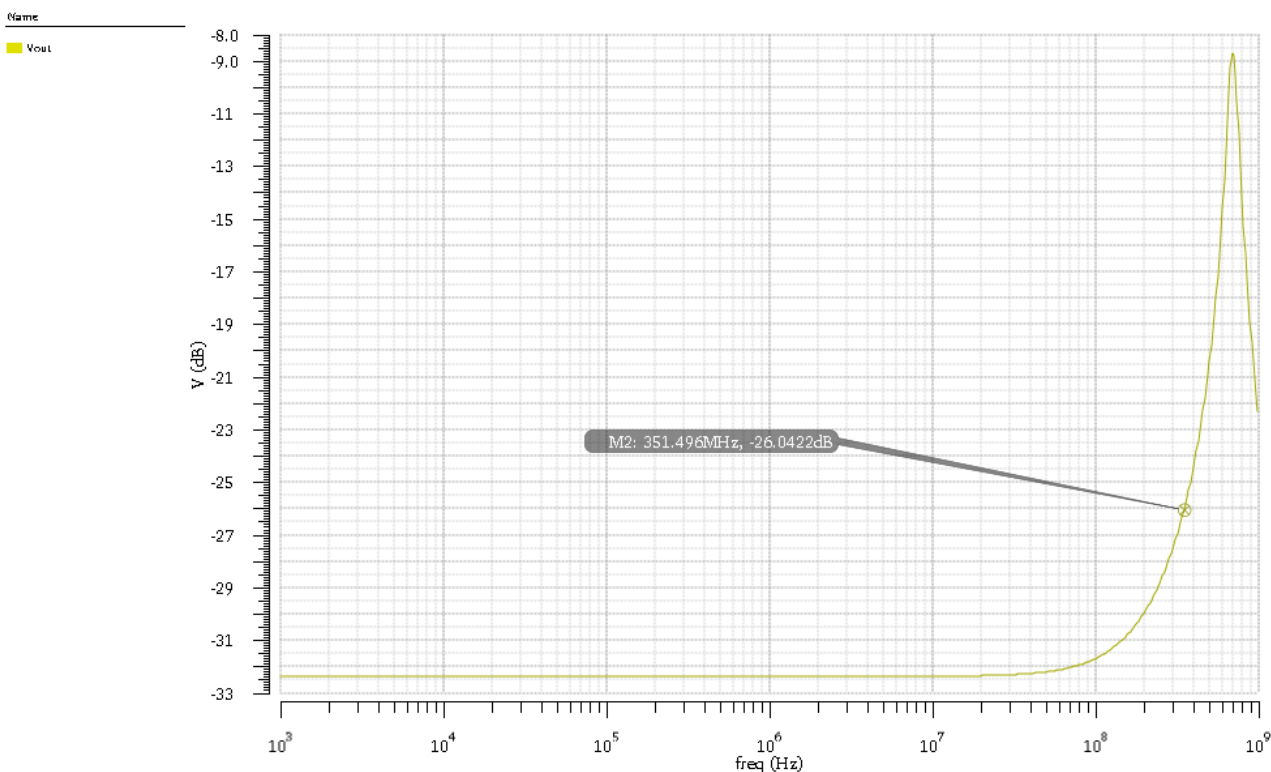


Figure 4 - Guadagno di modo differenziale

A_D [dB]	f_t [MHz]	m_ϕ [°]
46.08	351	83.5

Dall’analisi è emerso che la coppia presenta un guadagno di 46.08 dB, con una f_t pari a 351 MHz e margine di fase pari a 83.5°.

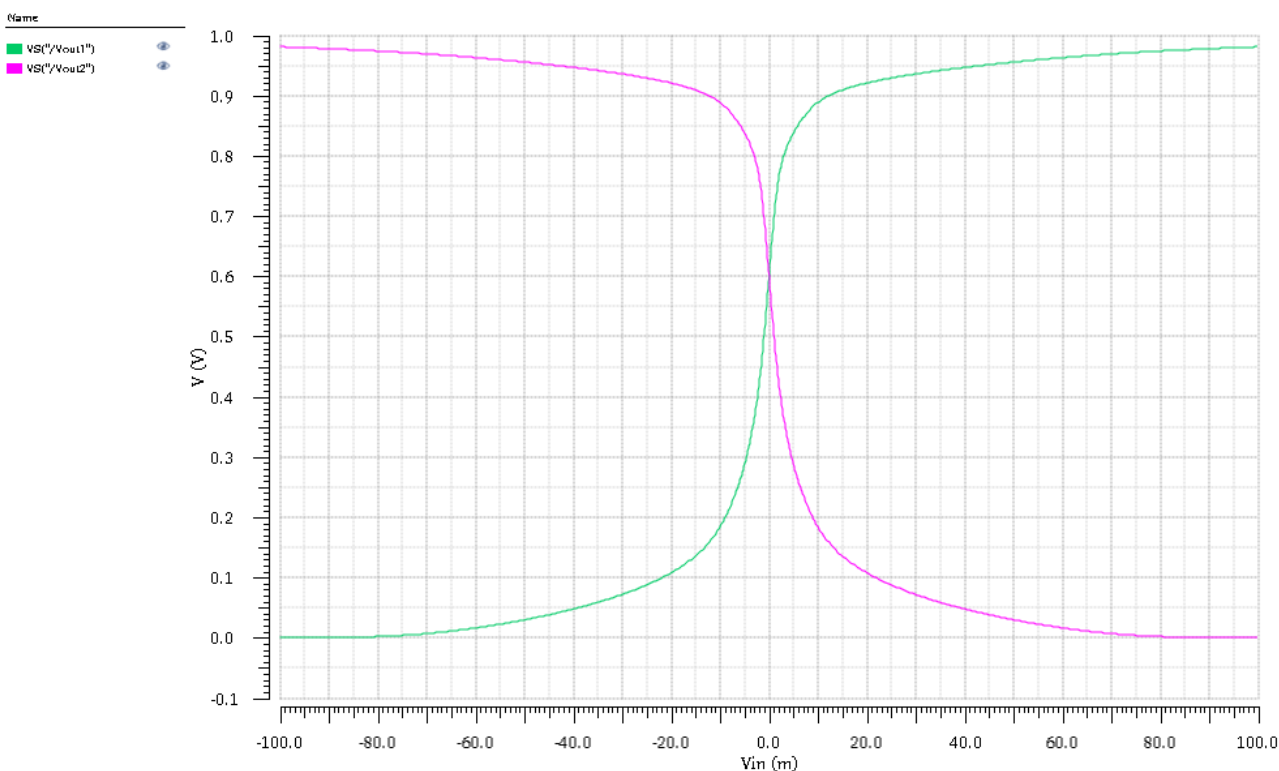
Effettuando invece l’analisi di modo comune è stato ricavato il seguente andamento del guadagno.



A_{CM}	$A_{694\text{ MHz}}$
-32.38 dB	-8.74 dB

Dall'analisi è emerso che il guadagno di modo comune in continua vale -32.38 dB, molto più basso rispetto ai 29.64 dB che si avevano senza CMFB, con un picco a 694 MHz di -8.74 dB.

Infine andando a ricavare la transcaratteristica dell'operazionale si ricava il seguente andamento.



Per verificare la stabilità è stato inoltre applicato un gradino di modo comune di ingresso e si è andato a vedere l'andamento del modo comune in uscita ottenendo il seguente andamento.

Transient Response

1

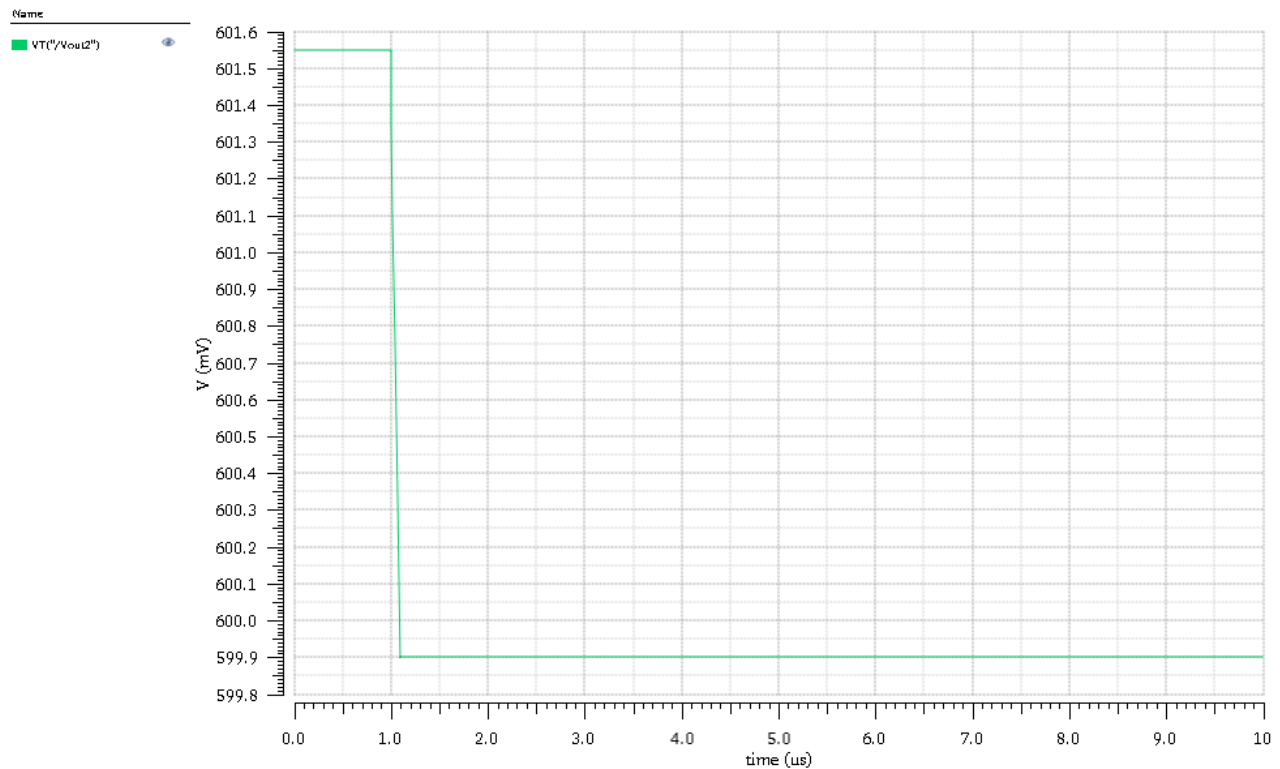


Figure 7- Risposta al gradino di modo comune

Dalla risposta al gradino si vede che il circuito risulta essere stabile.

Per quanto riguarda l'OPA con CMFB che sfrutta transistor in triodo è stato realizzato come riportato in figura 8.

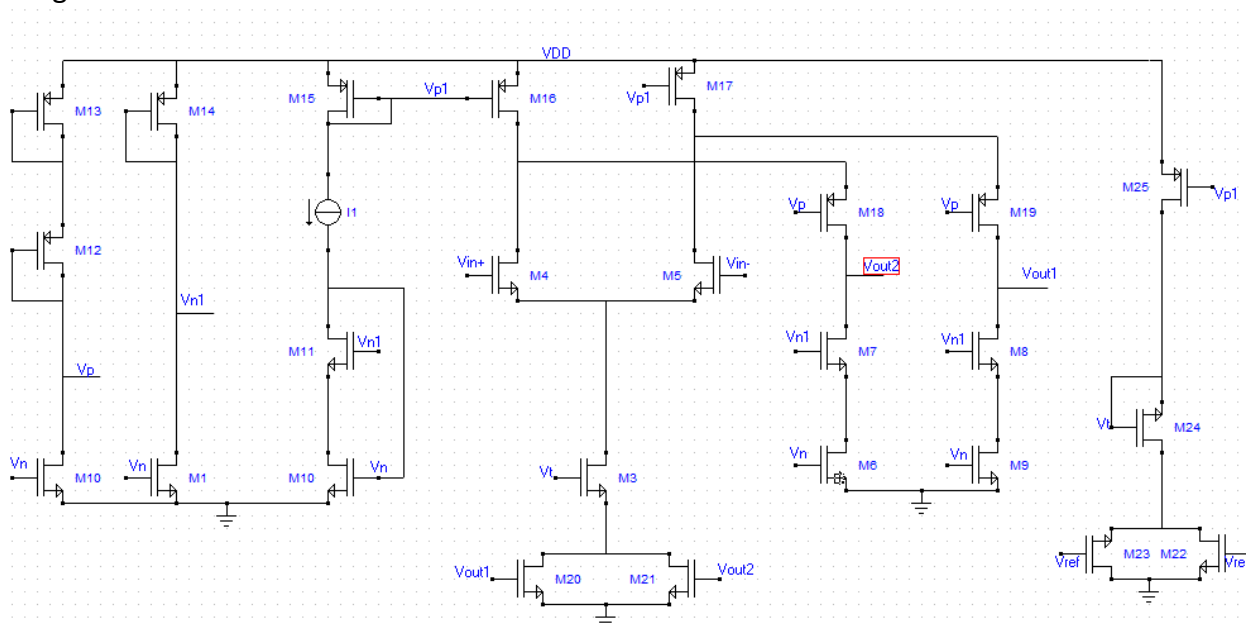


Figure 8 - OPA con CMFB

Rispetto al circuito in figura 1 si vede che il generatore di coda della coppia differenziale è stato degenerato da due transistor, M20 e M21, che lavorano in zona di triodo e sono pilotati dalle

tensioni di uscita. La tensione di gate del transistor di coda inoltre è fornita dal transistor 24, anch'esso degenerato da transistor in triodo, pilotati però dalla tensione di riferimento di 600 mV. La tensione sui drain dei transistor in triodo è stata fissata a 8.5 mV e la corrente nel ramo del transistor 24 è stata anch'essa posta pari a 212 μ A.

Nella seguente tabella vengono riassunte tutte le dimensioni dei transistor relativi al CMFB triodo di figura 8 e le correnti annesse, rimanendo gli altri invariati:

Tansistor	W [μ m]	L [μ m]	I [μ A]
M20-M21	25.8	0.04	106.4
M22-M23	25.8	0.04	105.87
M3	14.4	0.16	212.8
M24	10.44	0.16	211.74
M25	10.44x2	0.16	211.74

Effettuando l'analisi di modo differenziale è stato ricavato l'andamento del guadagno riportato nella seguente figura.

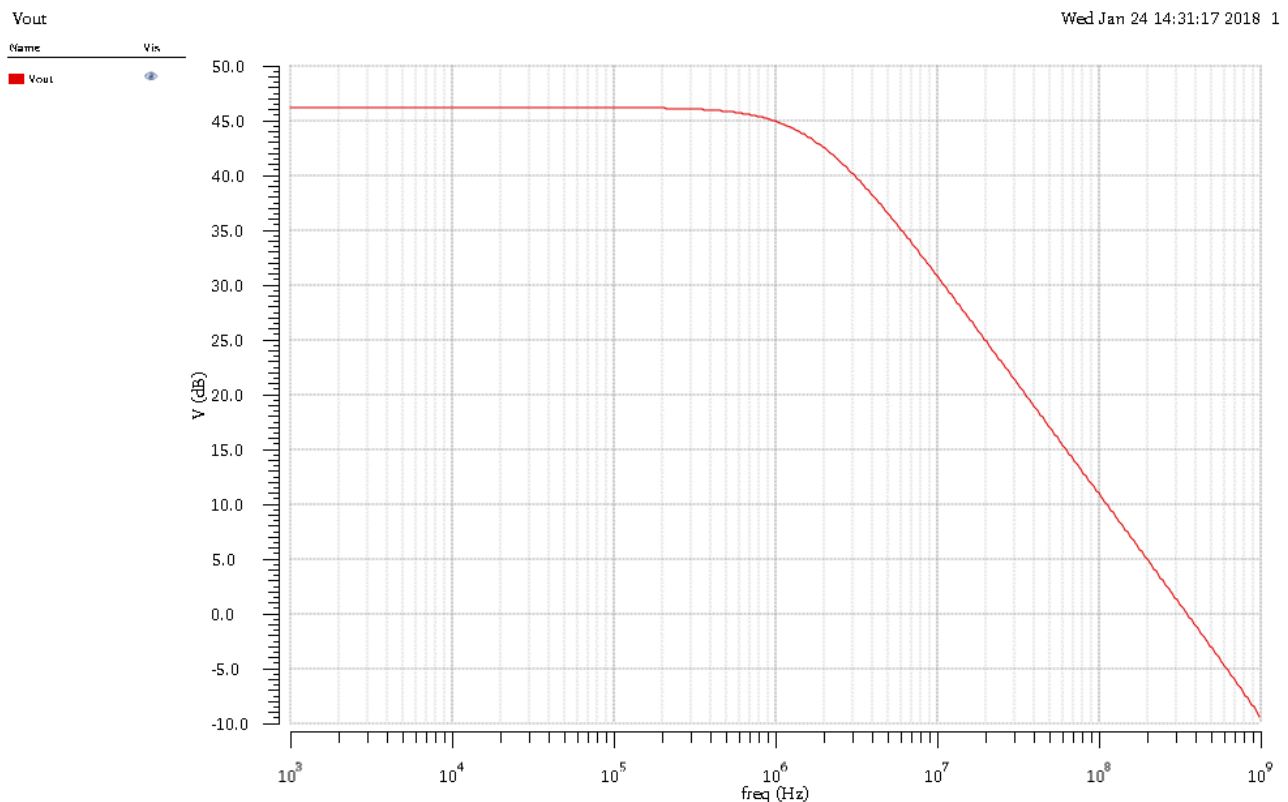


Figure 9 - Guadagno di modo differenziale

Da esso si ricava un guadagno di 46.08 dB, con una f_t pari a 351 MHz e margine di fase pari a 83.5°. Effettuando invece l'analisi di modo comune è stato ricavato il seguente andamento del guadagno.

Vout

Wed Jan 24 14:33:28 2018 1

Name	Vis
Vout	<input checked="" type="checkbox"/>

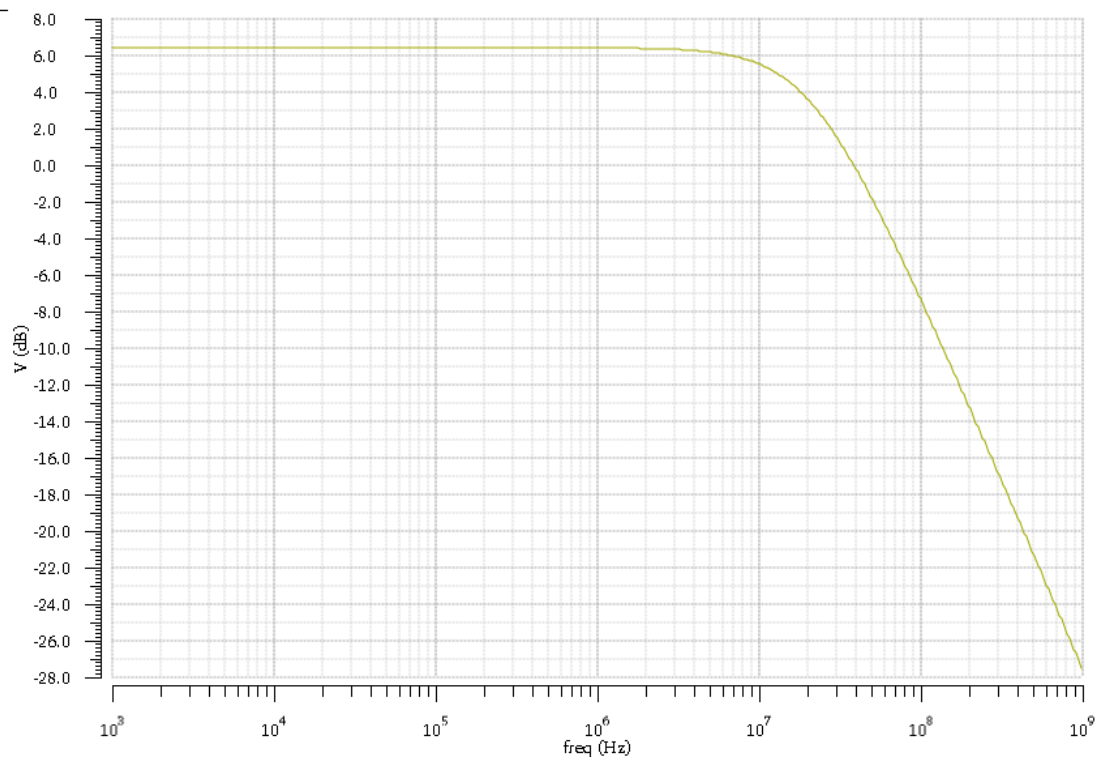


Figure 10 - Guadagno modo comune

Dalla figura 10 si vede che il guadagno di modo comune vale 6.3 dB e non presenta picchi, ma presenta un andamento di tipo passabasso.

A_D [dB]	A_{CM} [dB]	f_t [MHz]	m_φ [°]
46.08	6.3	351	83.5

Infine andando a ricavare la transcaratteristica dell'operazionale si ricava il seguente andamento.

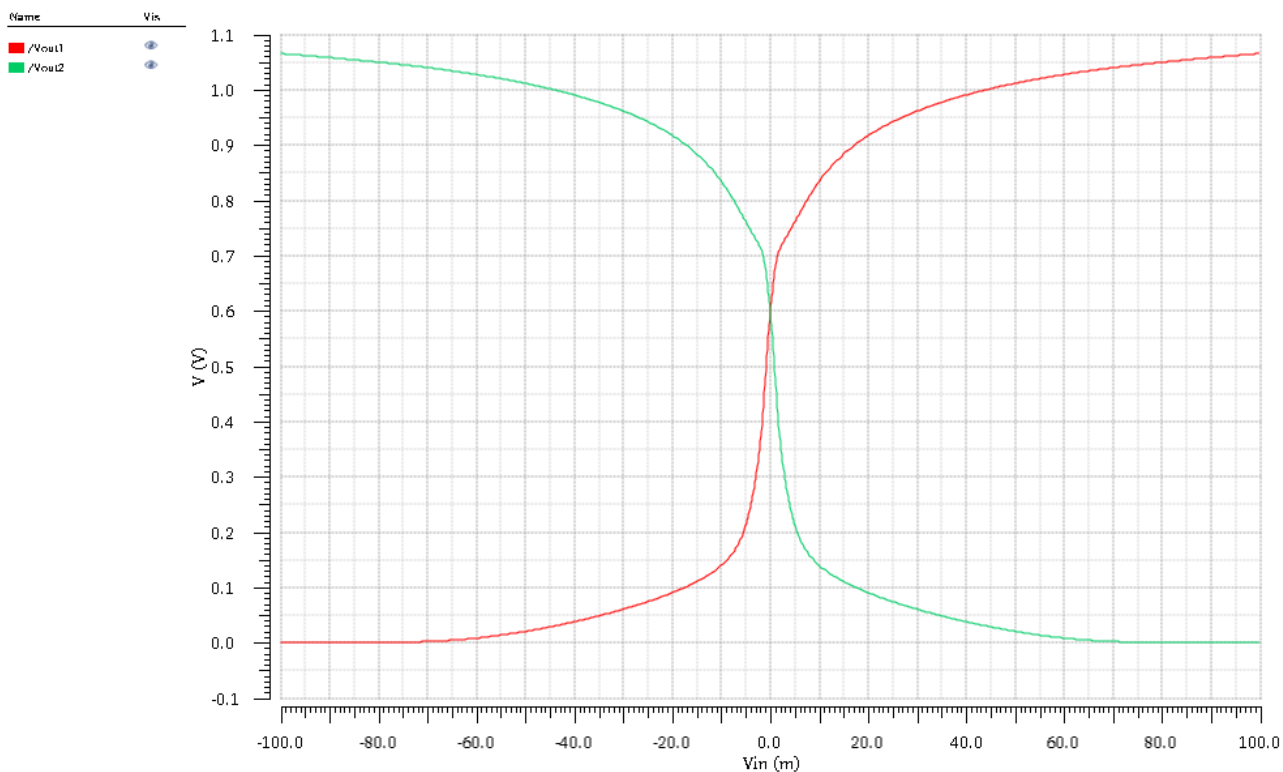


Figure 11 - Transacarteristica

3. OPA con guadagno 66 dB

Partendo dall'OPA rappresentato in figura 1, per ottenere un guadagno di 66 dB, si è andato ad applicare il gain boosting sul ramo di uscita tramite quattro amplificatori differenziali che guadagnassero 20 dB ciascuno.

Per entrambi i transistor di tipo p sul ramo di uscita è stato realizzato in seguente amplificatore.



Nella seguente tabella vengono riassunte tutte le dimensioni dei vari transistor di figura 12 e le correnti annesse:

I transistor n invece sono stati pilotati con il seguente amplificatore, del tutto duale a quello di figura 12.



Nella seguente tabella vengono riassunte tutte le dimensioni dei vari transistor di figura 13 e le correnti annesse:

Tansistor	W [μm]	L [μm]	I [μA]	Tansistor	W [μm]	L [μm]	I [μA]
M1	3.72	0.04	87.38	M4	4.08	0.12	1.38
M5	1.32	0.04	43.76	M2	0.24	0.04	1.38
M6	1.32	0.04	43.63	M3	0.24	0.04	1.22
M7	1.68	0.12	44.97				
M8	1.68	0.12	45.01				
M18	0.36	0.12	1.38				
M19	0.24	0.12	1.22				

Nel caso in cui è stato considerato il CMFB basato su coppie differenziali è stato ricavato il seguente guadagno di modo differenziale.

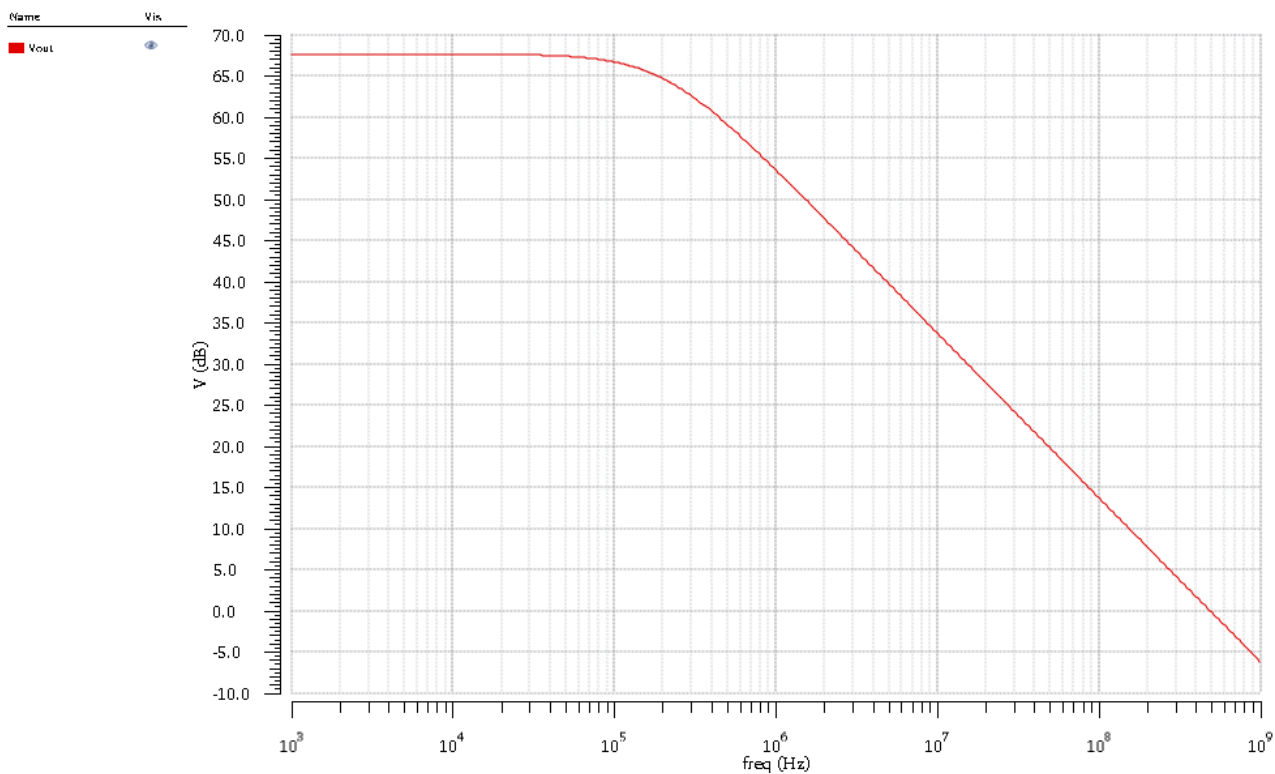


Figure 14 - Guadagno di modo differenziale

A_D [dB]	f_t [MHz]	m_ϕ [°]
67.6	487	75.2

Dall'analisi è emerso che il guadagno di modo differenziale vale 67.6 dB, la f_t vale 487 MHz ed il margine di fase vale 75.2°.

Effettuando invece l'analisi di modo comune è stato ricavato il seguente andamento del guadagno.

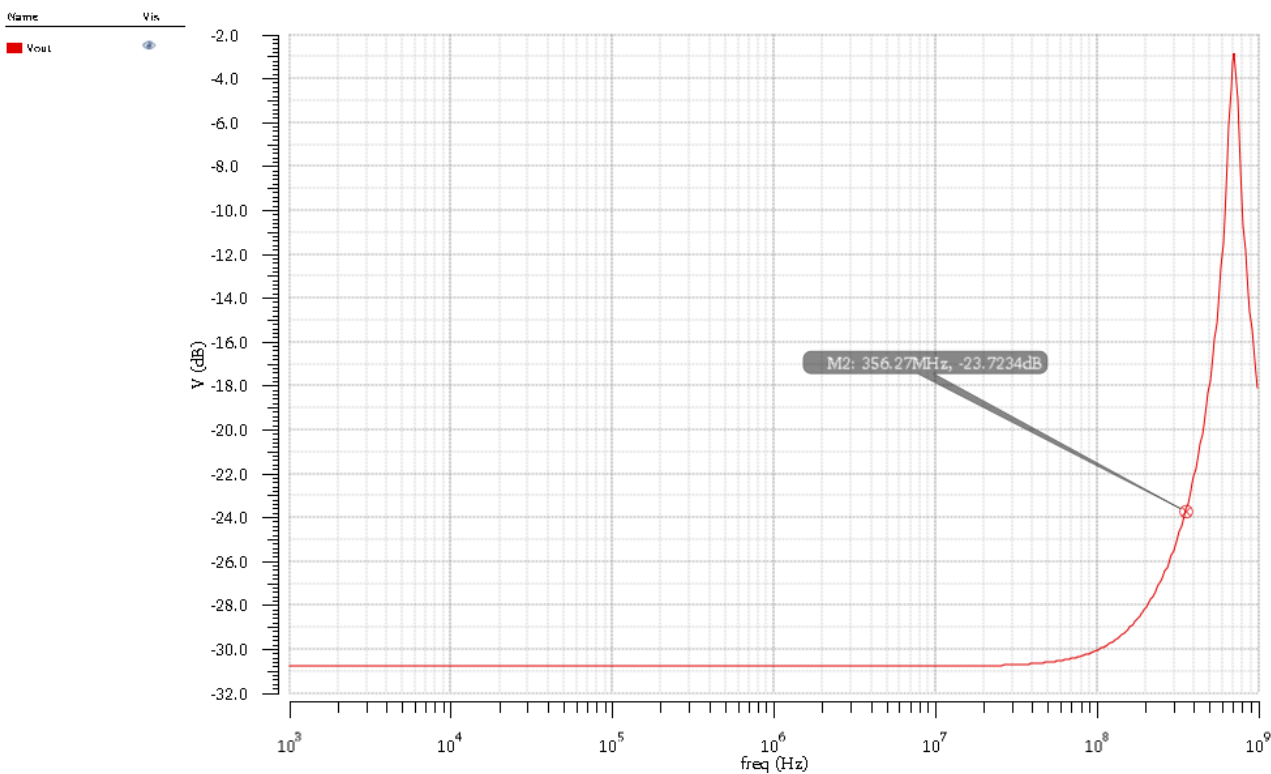


Figure 15 - Guadagno di modo comune

A_{CM}	A_{CM} 710 MHz
-30.8 dB	-2.9 dB

In questo caso il guadagno di modo comune vale -30.8 dB e presenta un picco a 710 MHz di -2.9 dB. Infine andando a ricavare la transcaratteristica dell'operazionale si ricava il seguente andamento.

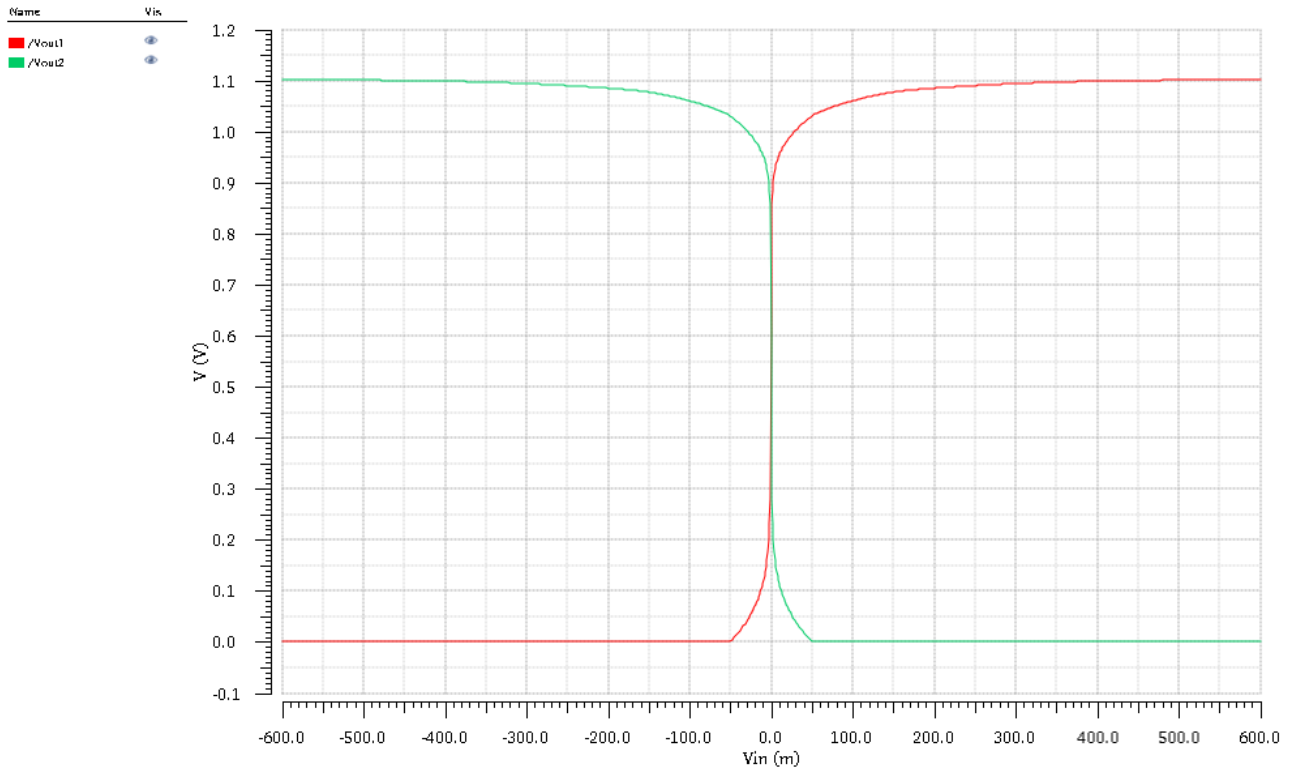


Figure 16 - Transcaratteristica

Anche per questa topologia circuitale è stata effettuata una verifica della stabilità andando a applicare in ingresso un gradino di modo comune ed andando a leggere l'andamento del modo comune d'uscita (figura 17).

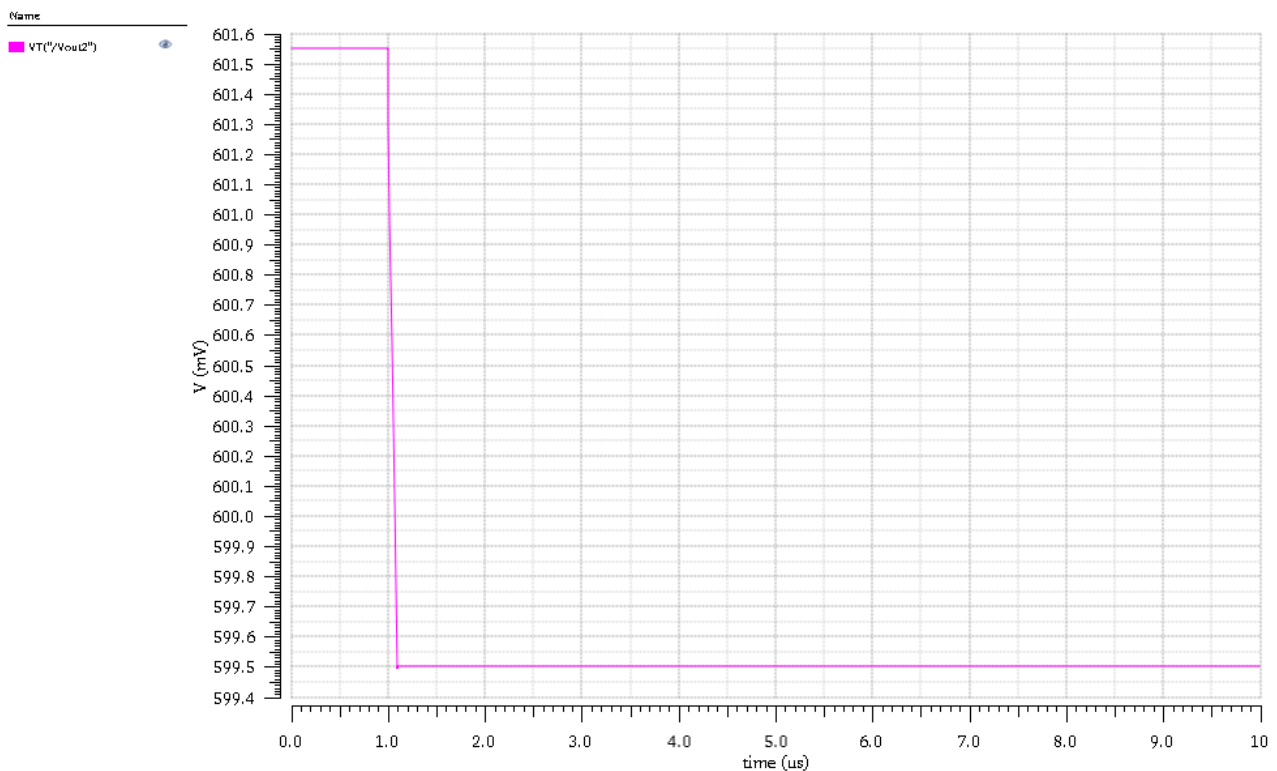


Figure 17 - Risposta al gradino di modo comune

Dalla figura 17 si può vedere che il circuito è stabile essendo che l'uscita non presenta oscillazioni.

Come detto in precedenza le medesime analisi sono state effettuate anche per l'OPA con gain boosting e CMFB basato su specchio di corrente degenerato da transistor in triodo.

Dall'analisi di piccolo segnale per il modo differenziale è stato ricavato il seguente andamento del guadagno in funzione della frequenza.

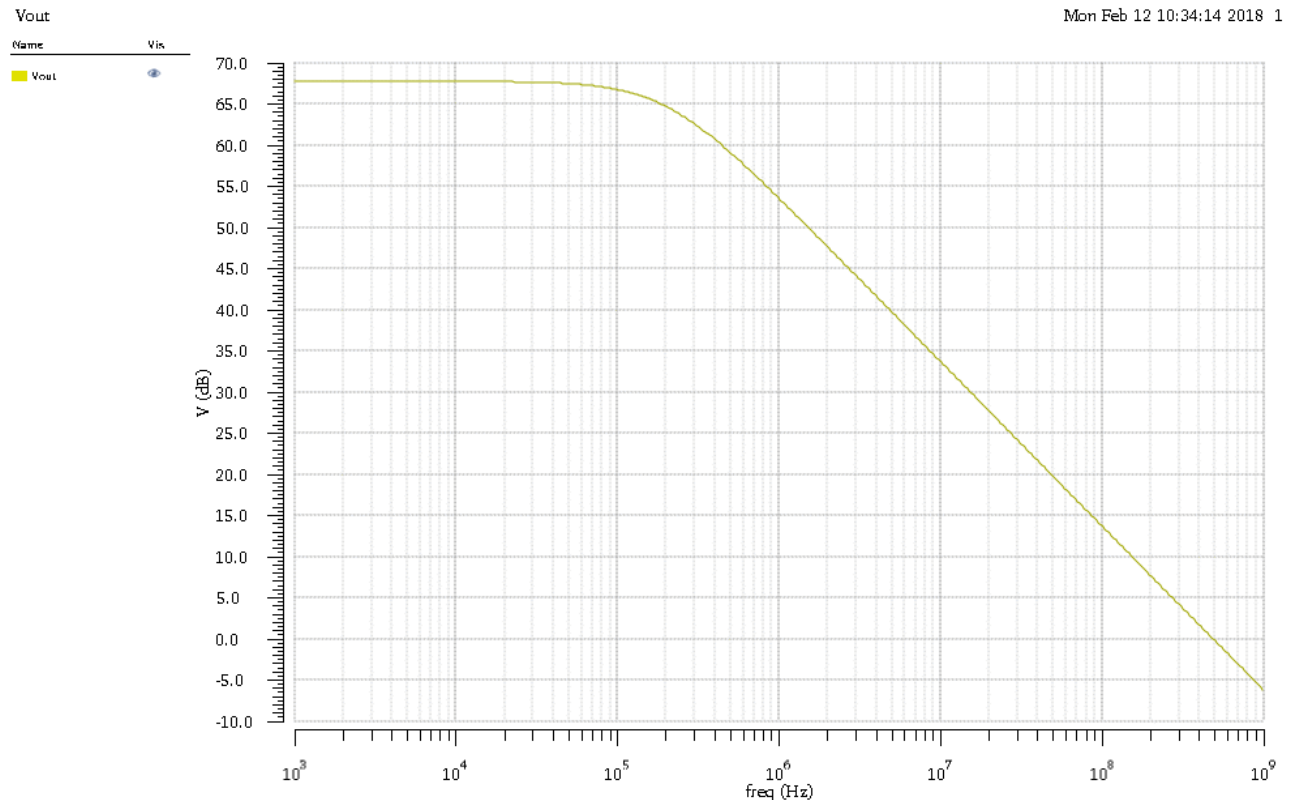


Figure 18 - Guadagno di modo differenziale

A_D [dB]	f_t [MHz]	m_ϕ [°]
68	487	75

Dall'analisi si è ricavato che il modulo vale 68 dB, la f_t vale 487 MHz ed il margine di fase vale 75°. Per quanto riguarda l'analisi di piccolo segnale per il modo comune è stato invece ricavato l'andamento del guadagno in funzione della frequenza riportato in figura 19.

Name	Vis
Vout	<input checked="" type="checkbox"/>

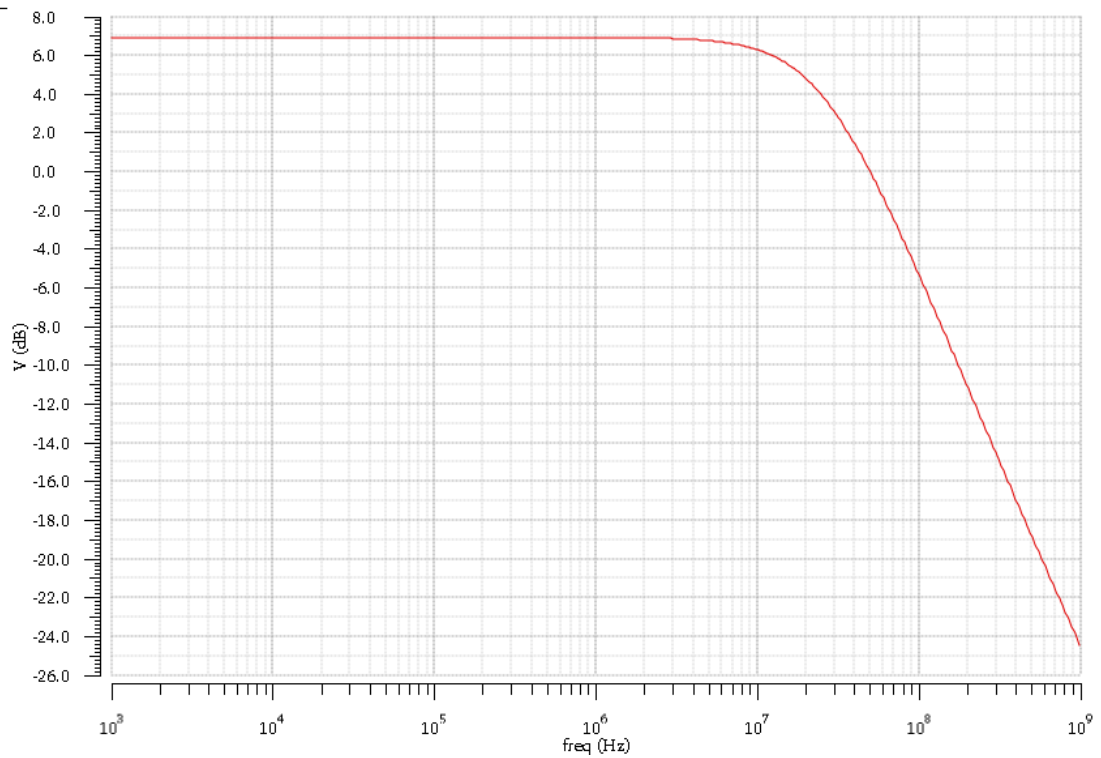


Figure 19 - Guadagno di modo comune

Da essa si vede che esso in continua vale 6.9 dB e che non presenta picchi essendo che ha un andamento di tipo passa basso.

Infine anche per questa topologia circuitale è stata ricavata la transcaratteristica, rappresentata i figura 20.

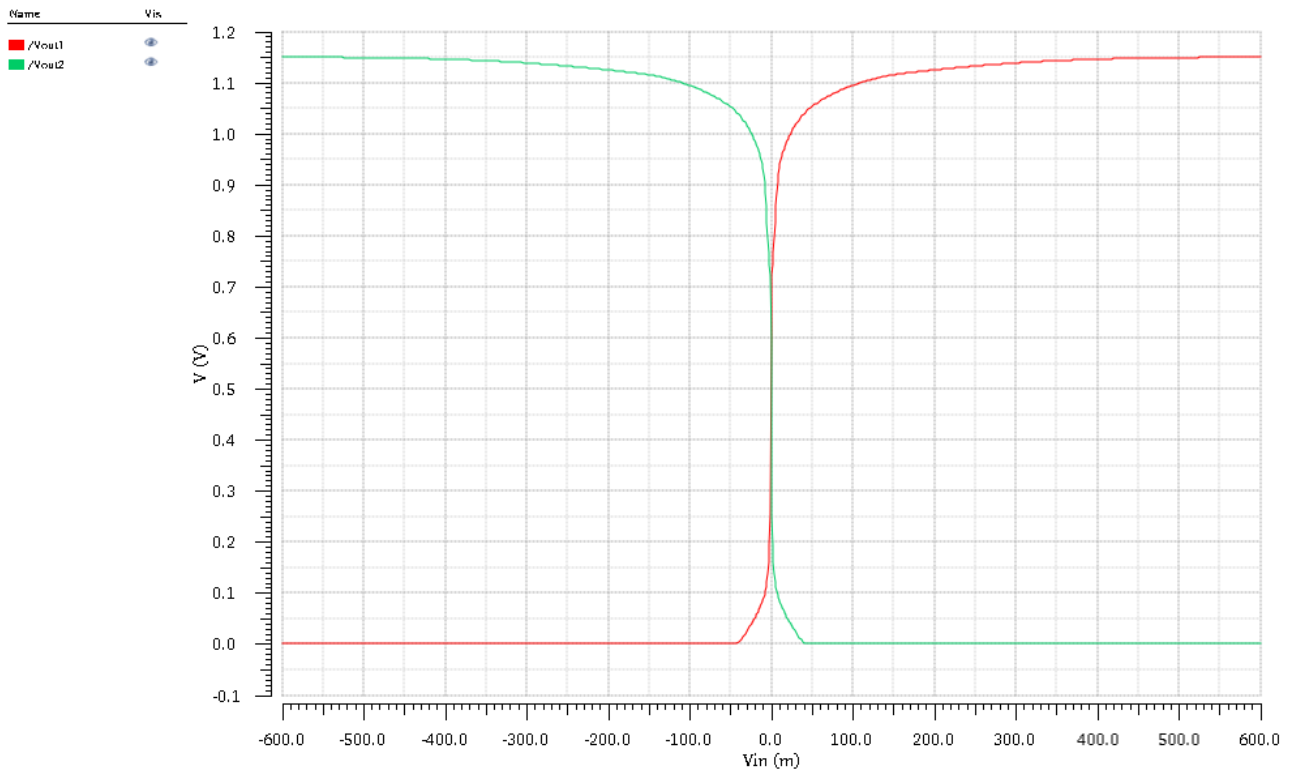


Figure 20 - Transcaratteristica

4. Variazioni di processo, mismatch ed analisi post layout.

Tutte le analisi trattate in precedenza sono state effettuate considerando i transistor in condizioni tipiche. Successivamente sono state ripetute le medesime analisi andando a variare i corner dei transistor e considerando tutte e quattro le combinazioni possibili di transistor a canale p ed a canale n lenti e veloci.

Per ogni topologia presentata in precedenza e per ogni combinazione di transistor è stato ricavato:

- tensione di uscita statica
- guadagno di modo differenziale
- frequenza di transizione
- margine di fase
- guadagno di modo comune in continua
- picco del guadagno di modo comune.

Tali risultati vengono riassunti nelle seguenti tabelle.

Tabella 1 - OPA 46 dB, CMFB basato su coppia differenziale

	FF	FS	SF	SS
V_{out} [V]	0.598	0.603	0.601	0.605
A_d [dB]	45.2	46.3	44.9	44.9
f_t [MHz]	322	360	330	363
$M\phi$ [°]	84	83	84	83
A_c [dB]	-36.6	-35.58	-29.5	-27.66
A_{c_peak} [dB]	-15.9	-12.6	-2.5	1.46

Dalla tabella 1 si vede che per l'OPA con guadagno 46 dB e CMFB basato su coppia differenziale la tensione statica d'uscita resta fondamentalmente costante al variare delle caratteristiche di processo, così come il margine di fase che resta sempre compreso tra gli 83° e gli 84°. Il guadagno di modo differenziale invece tende a variare di poco diminuendo al massimo di 1 dB. La frequenza di transizione invece è quella che risente di più delle variazioni di processo, scendendo addirittura sotto le specifiche nei casi "fast- fast" e "slow-fast".

Per quanto riguarda il modo comune invece, il guadagno in continua varia ma resta comunque inferiore a -27 dB, invece in guadagno di picco varia sensibilmente, specialmente nelle condizioni "slow-fast" e "slow-slow", arrivando ad essere addirittura positivo. Il picco si trova comunque a frequenze superiori rispetto alla frequenza di transizione.

Tabella 2 - OPA 46 dB, CMFB basato su specchio degenerato da transistor in triodo

	FF	FS	SF	SS
Vout [V]	0.479	0.535	0.675	0.851
Ad [dB]	41.7	47.1	43.9	26.2
f_t [MHz]	315	363	330	363
M ϕ [°]	84	83	84	87
Ac [dB]	-6.9	0.13	14.8	14
Ac_peak [dB]	/	/	/	/

Per quanto riguarda l'OPA con guadagno 46 dB e CMFB basato su specchio di corrente degenerato da transistor in triodo, si vede dalla tabella 2 che esso al variare delle caratteristiche di processo perde completamente la polarizzazione, portando la tensione statica di uscita ad avere offset significativi rispetto al valore voluto di 0.6 V e rendendo quindi ruperflue le successive analisi.

I dati ricavati vengono comunque riportati per completezza.

Tabella 3 - OPA 66 dB, CMFB basato su coppia differenziale

	FF	FS	SF	SS
Vout [V]	0.599	0.603	0.601	0.604
Ad [dB]	65.6	68.7	65.4	68.1
f_t [MHz]	479	482	467	479
M ϕ [°]	75	65	78	76
Ac [dB]	-34.7	-33.9	-27.7	-26.5
Ac_peak [dB]	-1.4	-9.4	20.7	5.3

Anche per l'OPA con guadagno 66 dB, nel caso in cui si considera il CMFB basato su coppia differenziale, la tensione statica di uscita resta fondamentalmente costante al variare delle caratteristiche di processo.

Il guadagno di modo differenziale invece varia leggermente, rispetto alle condizioni tipiche in cui vale 67 dB, arrivando ad assumere valore minimo pari a 65.4 dB, valore leggermente inferiore alla specifica di 66 dB.

La frequenza di transizione tende anche a diminuire, diminuendo di un massimo di 20 MHz nel caso "slow-fast", rispetto alle condizioni tipiche, restando comunque ben al di sopra dei 350 MHz chiesti. Discorso analogo alla frequenza di transizione vale anche per il margine di fase.

Per quanto riguarda il modo comune invece, il guadagno in continua varia ma resta comunque inferiore a -26 dB, invece in guadagno di picco varia sensibilmente arrivando a valere addirittura 20.7 dB.

Tabella 4 - OPA 66 dB, CMFB basato su specchio degenerato da transistor in triodo

	FF	FS	SF	SS
Vout [V]	0.518	0.519	0.747	0.761
Ad [dB]	66.5	69.3	58.7	59.5
f_t [MHz]	484	482	471	477
M ϕ [°]	75	66	77	74
Ac [dB]	-1.3	-1.5	22.2	23.7
Ac_peak [dB]	/	/	/	/

Per la configurazione che utilizza il CMFB basato su specchio di corrente degenerato da transistor in triodo, come nel caso dell'OPA a 46 dB, la tensione statica di uscita varia sensibilmente al variare dei parametri di processo, spolarizzando il circuito e rendendo superflue le successive analisi.

Confrontando i risultati ottenuti emerge che delle due configurazioni di CMFB, quella meno sensibile alle variazioni di processo è quella che sfrutta la cella differenziale essendo che riesce a mantenere costante la polarizzazione sui rami di uscita e quindi a far variare in modo minore le prestazioni del circuito.

A questo punto per vedere come le due topologie di CMFB si comportano in presenza di mismatch è stato scelto di effettuare un'analisi montecarlo solo per l'OPA che presenta un guadagno di 46 dB in condizioni tipiche di processo.

Le grandezze che si sono andate a valutare nell'effettuare questa analisi sono state il guadagno di modo differenziale, la frequenza di transizione, il margine di fase, la statica di modo comune in uscita, il guadagno di modo comune in continua ed il valore di picco.

In aggiunta a queste grandezze è stato misurato l'HD2 mettendo in ingresso un segnale sinusoidale che garantisse in condizioni nominali un HD3 di 40 dB. La frequenza di tale segnale sinusoidale è di 10 kHz e l'ampiezza di 500 μ V. Nell'analisi sono state effettuate 100 iterazioni.

I risultati ottenuti per il circuito con CMFB basato su coppia differenziale sono riportati nella seguente figura.

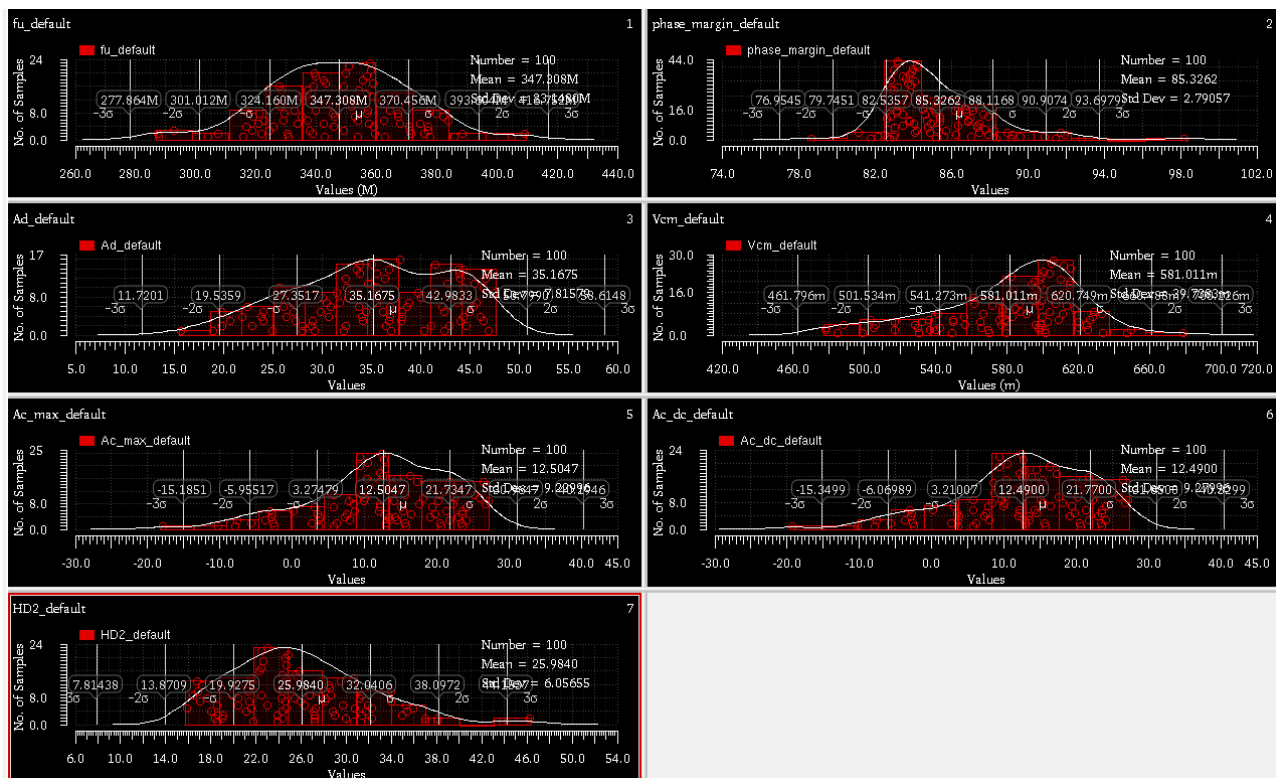


Figure 21 - Risultati analisi montecarlo per OPA con CMFB basato su coppia differenziale

Dall'analisi è emerso che per quanto riguarda il valore della tensione statica di modo comune in uscita si ha un valore medio di 581 mV con una deviazione standard di 39.7 mV.

Il guadagno di modo differenziale invece presenta un valore medio di 35.2 dB con una deviazione standard di 7.8 dB. La frequenza di transizione invece presenta un valore medio di 347 MHz con deviazione standard di 23 MHz. Il margine di fase presenta un valore medio di 85° ed una deviazione standard di 2.8°. Il guadagno di modo comune in continua presenta un valor medio di 12.5 dB con deviazione standard di 9.2 dB. Il picco del guadagno di modo comune presenta anch'esso un valore medio di 12.5 dB con varianza di 9.2 dB. Infine, l'HD2 presenta un valore medio di 26 dB e 6 dB di deviazione standard.

I risultati ottenuti dall'analisi montecarlo effettuata all'OPA con CMFB basato su specchio di corrente degenerato da transistor in triodo sono riportati nella figura 22.

È da precisare che nel momento della stesura di questo documento ci si è resi conto che per questa analisi, a differenza della precedente, sono state effettuate 200 iterazioni. Essendo che l'analisi è un'analisi di tipo statistico, si è ritenuto che questo non fosse un problema al fine di effettuare un confronto tra le due topologie.

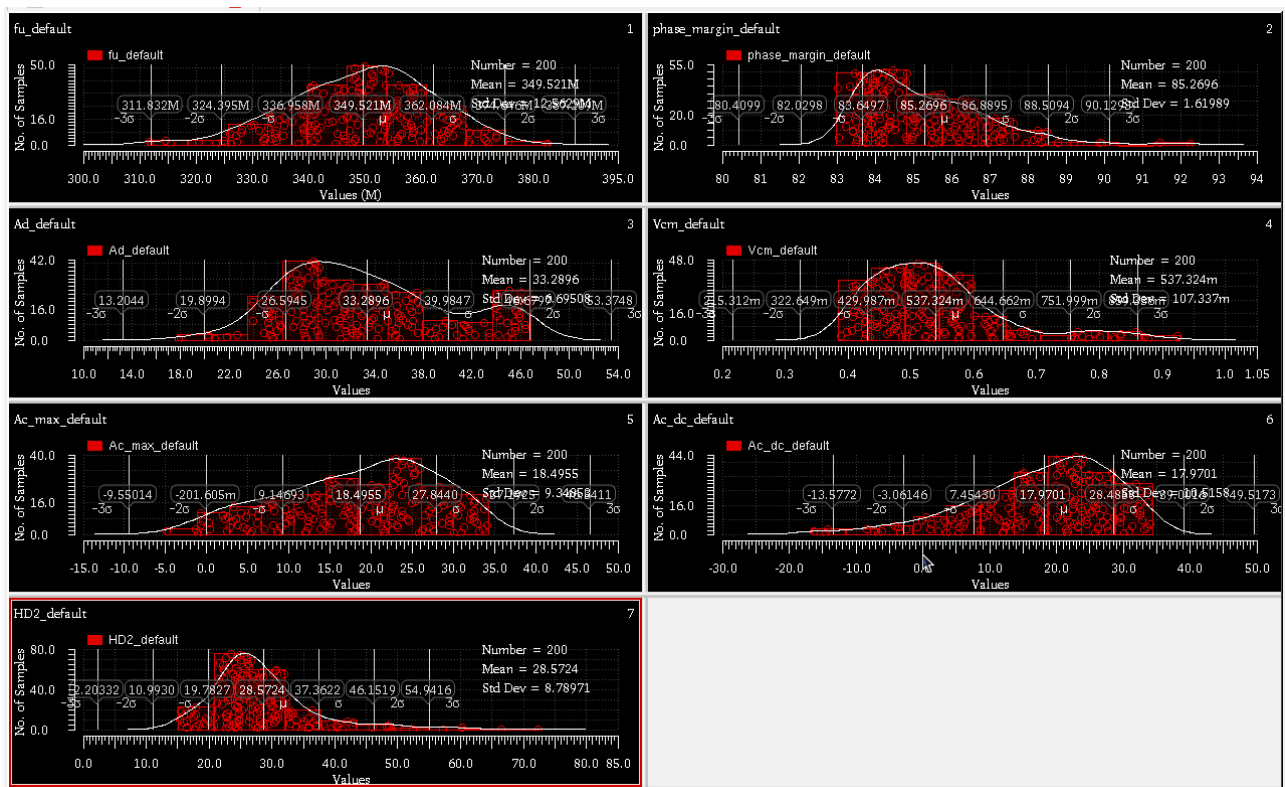


Figure 22 - Risultati analisi montecarlo per OPA con CMFB basato transistor in triodo

Per quanto riguarda questa topologia si vede che la tensione statica di modo comune in uscita ha valore medio di 537 mV e deviazione standard di 107 mV.

Il guadagno di modo differenziale ha valore medio pari a 33 dB e deviazione standard pari a circa 7 dB. La frequenza di transizione ha valore medio di 349 MHz con deviazione standard di 12.5 MHz. Il margine di fase ha valore medio di 85° con deviazione standard di 1.6°.

Per il guadagno di modo comune si vede che il valore in continua ha valore medio pari a 17.9 dB con deviazione standard pari a 10.5 dB ed il valore di picco presenta un valore medio di 18.5 dB con deviazione standard pari a 9.4 dB.

Infine, l'HD2 presenta un valore medio di 28 dB ed una deviazione standard pari a 8.8 dB.

Effettuando un confronto tra i risultati ottenuti per le due strutture si vede che sicuramente, anche sotto mismatch il CMFB con coppia differenziale riesce a fissare meglio la statica d'uscita e quindi si ottengono anche prestazioni migliori dell'OPA per quanto riguarda il guadagno di modo differenziale, anche se comunque viene abbassato a causa dei mismatch. Per quanto riguarda l'effetto sulla frequenza di transizione non si apprezza una effettiva differenza tra le due topologie di CMFB, così come per il margine di fase.

Invece per quanto riguarda il guadagno di modo comune invece il discorso è differente. Il CMFB basato su coppie differenziali peggiora nettamente le proprie prestazioni passando da un guadagno di modo comune in condizione di matching pari a -32 dB ad un valore medio di 12.5 dB.

Invece il CMFB basato su specchio di corrente degenerato da transistor in triodo, partendo da un valore di guadagno di modo comune più alto in condizioni di matching peggiora di meno le proprie caratteristiche, anche se il valore medio del guadagno di modo comune in continua risulta comunque maggiore dell'altro CMFB.

Quindi in definitiva si può dire che il CMFB basato su coppia differenziale sente maggiormente la presenza di mismatch, ma, avendo un guadagno in condizione ideale maggiore di quello dell'altro CMFB, riesce comunque a garantire prestazioni migliori.

Ultimo step di questo lavoro è stato quello di realizzare il layout di una delle 4 topologie realizzate ed effettuare delle analisi una volta effettuata l'estrazione delle parassite.

La scelta sul circuito di cui si è voluto realizzare il layout è ricaduta sull'OPA che presenta guadagno di 46 dB e CMFB basato su coppia differenziale.

Le grandezze analizzate considerando le parassite introdotte nel layout sono state le stesse analizzate durante l'analisi montecarlo.

Nella seguente tabella viene riportato il confronto tra i parametri considerando e senza considerare le parassite.

	con parassite	senza parassite
Vcm [V]	0.593	0.601
Ad [dB]	41.5	46
f_t [MHz]	363	351
M ϕ [°]	79	83
Ac_dc [dB]	17.9	-32
Ac_peak [dB]	17.9	-7.3
HD2 [dB]	20	60

Si vede come la presenza delle parassite vada a peggiorare il guadagno di modo differenziale e vada ad aumentare il guadagno di modo comune.

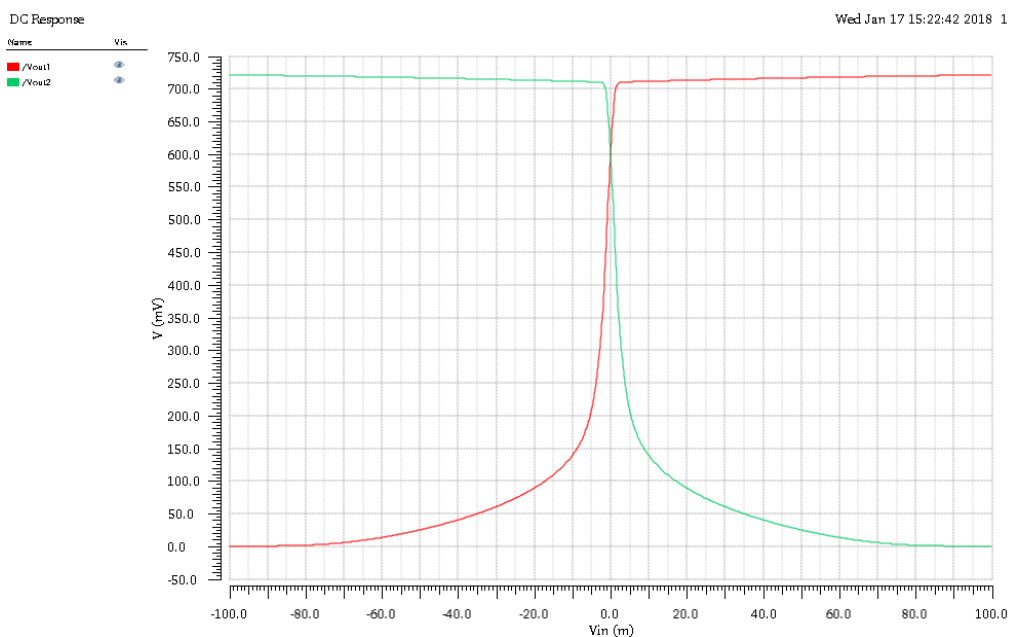


Figura 5.5 - Transcaratteristica OPA con CMFB nMOS

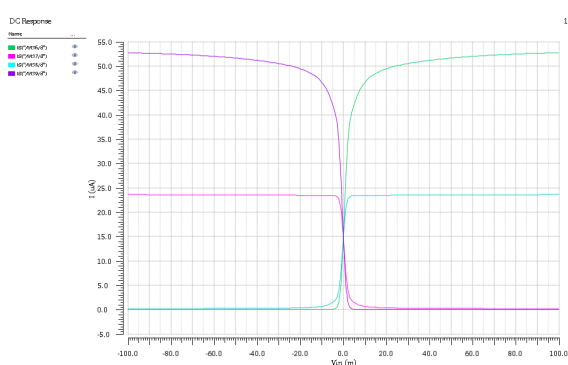


Figura 5.6 - Correnti rami CMFB nMOS

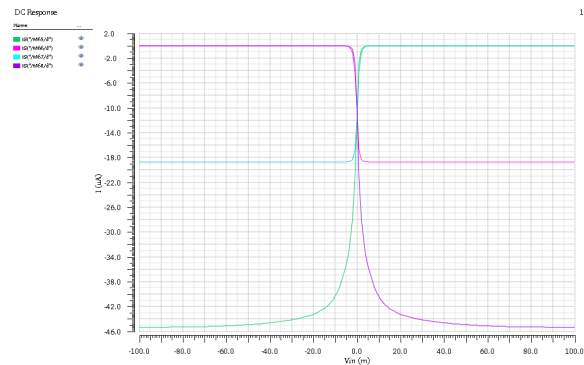


Figura 5.7 - Correnti rami CMFB pMOS

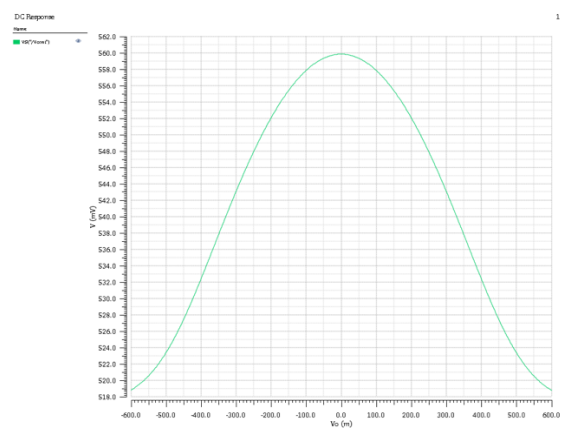


Figura 5.8 - V_{OUT}/V_{IN}

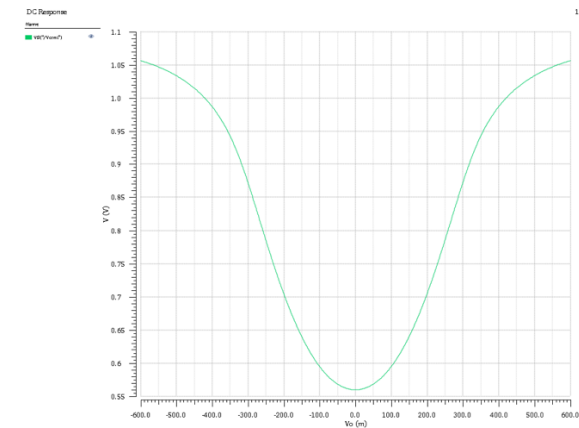


Figura 5.9 - V_{CMFB}/V_{OUT} CMFB_{MOSn}

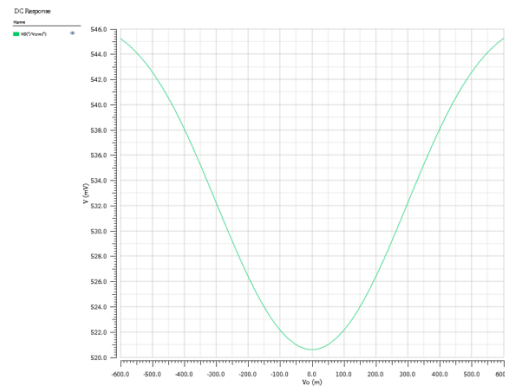


Figura 5.10 – $V_{CMFB}/V_{OUT\ CMFB\ MOSp}$.

Dal comportamento delle correnti si evince come la corrente nel transistor del CMFB a cui sale la tensione di ingresso aumenti eccessivamente a causa della resistenza finita del transistor di coda che non ha un comportamento lineare. La configurazione complementare pMOS, in seguito ai risultati delle simulazioni sopra riportati graficamente, presenta un problema del tutto analogo, seppur duale.

Poiché lo scopo è di mantenere bassa la corrente di polarizzazione, al fine di renderla trascurabile nei consumi totali dell'OPA rispetto al circuito di amplificazione stesso, non è possibile implementare una configurazione cascode del generatore di coda. Infatti a causa delle correnti sui rami molto piccole non si è in grado di polarizzare in regione di saturazione il quarto transistor in serie (la polarizzazione dei tre transistor in serie si è già rivelata ostica e al limite nei dimensionamenti dei transistor con aree piccole).

L'idea è stata quindi di 'accoppiare' le due configurazioni tra di loro collegando insieme i nodi che forniscono la tensione di controllo. In tal modo anche se in entrambe le configurazioni un transistor si spegne (quello che vede salire la tensione nel CMFB pMOS e quello che la vede scendere nel CMFB nMOS), quello che resta acceso viene 'compensato' dal transistor dell'altra configurazione, in maniera che la corrente complessiva al nodo di controllo non vari e quindi non vari la tensione di controllo. Perché funzioni correttamente questa soluzione è che i due transistor (uno di tipo n e l'altro di tipo p) si spengano contemporaneamente e che i due transistor che restano accesi portino la stessa corrente, anche in seguito alle variazioni dovute alla resistenza di uscita finita del generatore di coda.

La successiva chiusura a specchio di corrente comporta una forzatura di 'controreazione' che si instaura tra le due celle complementari, in quanto l'una non è in grado di modificare il comportamento non lineare dell'altra, bensì è in grado solamente di compensarne la non linearità. Le due celle presentando contemporaneamente anche il comportamento lineare, in modo duale tra loro, facendo sì che la corrente non si sbilanci del tutto dalla parte 'forte' (MOS acceso) tirandone via la corrente in eccesso. Per questo si parla di controreazione in quanto il difetto della prima viene compensato dall'eccesso della seconda (tiro di corrente contrario) il quale eccesso tuttavia viene limitato dalla funzionalità in eccesso della prima stessa (errore di corrente prima descritto).

Per concludere la configurazione con CMFB MOSn-p a ActiveLoad (figura 5.11) ci ha permesso di ottenere, grazie alla linearità raggiunta del generatore di coda come da figura 5.12, i risultati già descritti nei paragrafi precedenti: reiezione di modo comune pari a 62 dB (52 dB a 351.5 MHz, limite banda OPA, figura 5.14) con un andamento della transcaratteristica particolarmente lineare come in figura 5.13.

[n.b. Osserviamo come i due CMFB accoppiati hanno un carico trascurabile verso l'uscita dell'OPA, che mantiene la sua banda ed il suo guadagno invariati].

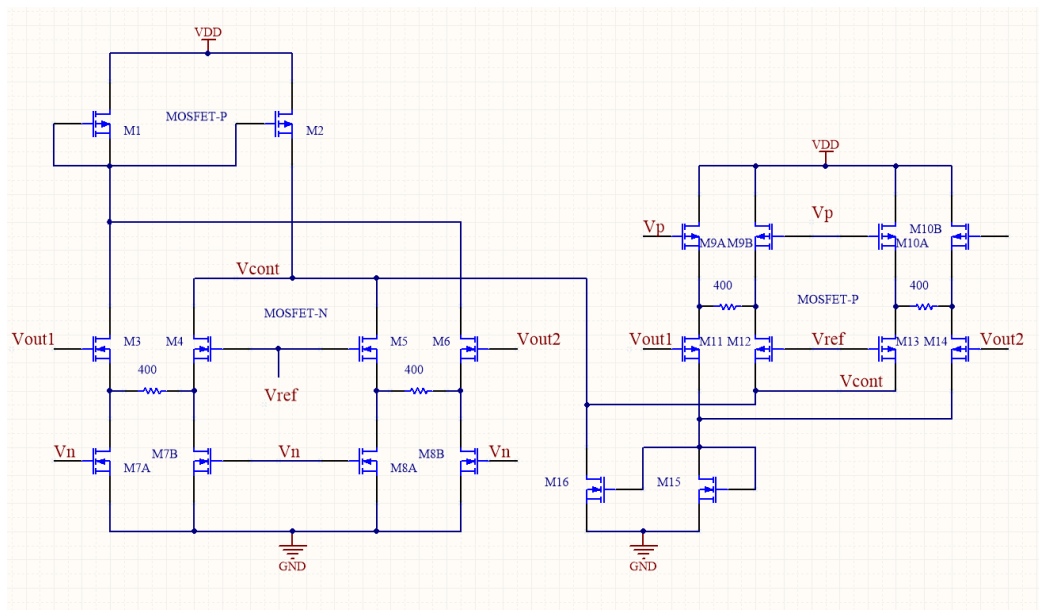


Figura 5.11 – Schema CMFB nMOS/pMOS con carico attivo

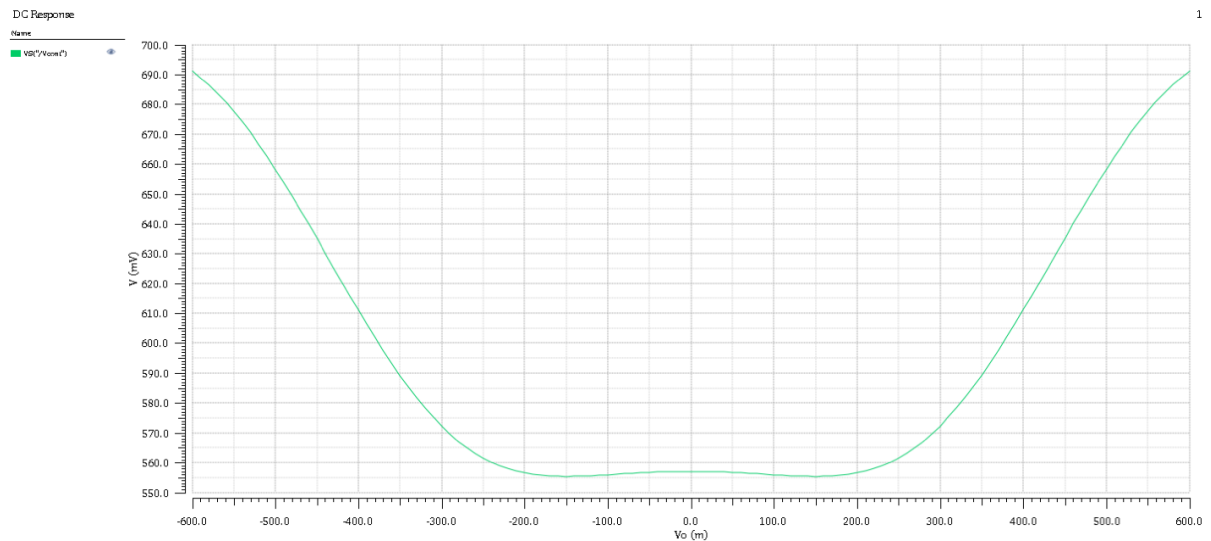


Figura 5.12 – V_{CMFB}/V_{OUT} CMFB coppia MOS n-p

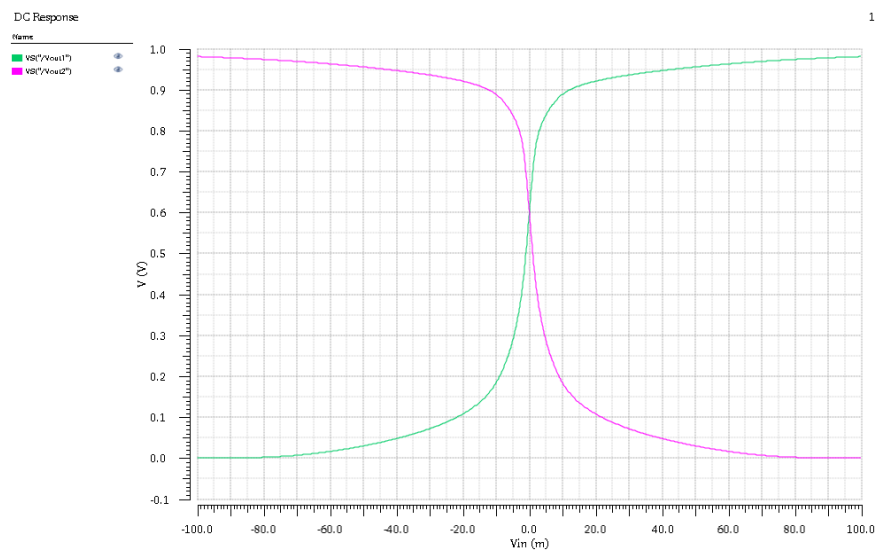


Figura 5.13 - Transcaratteristica OPA CMFB nMOS/pMOS

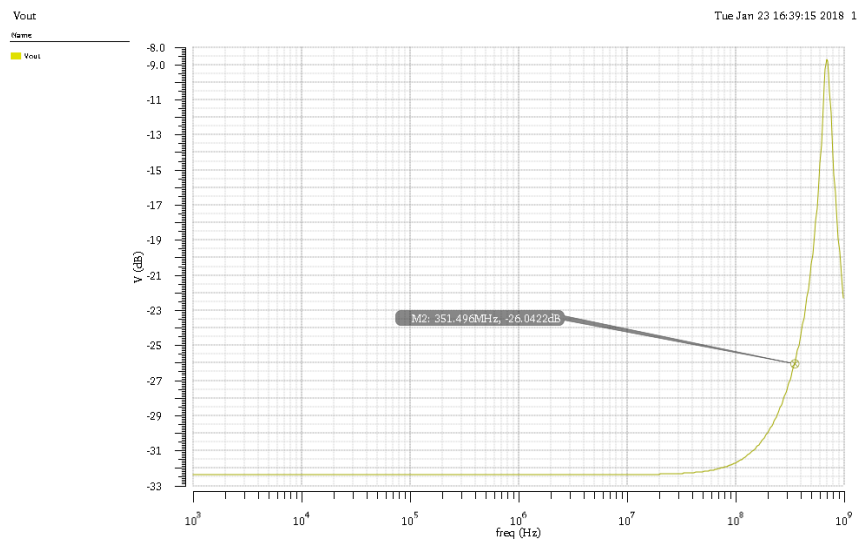


Figura 5.14 – A_{CM} OPA con CMFB nMOS/pMOS