

Estudio de Amplificadores Diferenciales con Carga Activa y Otros Tipos de Fuente de Corriente.

Luis F. De La Hoz Cubas, María I. Dovale Pérez, Edgar F. Florez Ostos, Paul A. Smit Caballero
División de Ingenierías
Universidad del Norte
Barranquilla

Abstract—En el siguiente informe se comprueba y analiza el comportamiento de algunas configuraciones especiales usadas para la implementación de amplificadores diferenciales realizando un estudio experimental de estos con cargas activas basados en tecnologías BJT y BiCMOS con el fin de analizar sus características, ventajas y desventajas. Además de esto se realiza una comprobación del desempeño de otras configuraciones especiales de fuentes de corriente para establecer un criterio basado en lo comprobado y discriminar así mismo cual de estas puede ser utilizada en diferentes aplicaciones.

I. INTRODUCCION

EN este laboratorio la intención es comprobar y analizar el comportamiento de algunas configuraciones especiales utilizadas para la implementación de amplificadores diferenciales. Esto se realizará con cargas activas basados en BJT y BiCMOS, analizando sus principales características y ventajas. Además se estudiarán otras configuraciones especiales de fuentes de corriente, con el fin de realizar una comprobación del desempeño de cada una de ellas.

Unas de las configuraciones puestas en práctica será el amplificador diferencial que utiliza carga activa, la cual se caracteriza por que el transistor (BJT) se conecta como fuente de corriente constante y se presenta al transistor amplificador con una carga muy elevada de resistencia (la resistencia de salida de la fuente de corriente). Por lo tanto, los amplificadores que utilizan cargas activas pueden alcanzar de voltaje más altos que aquellos con cargas pasivas (resistivas). Este circuito consta de cuatro transistores donde Q1 y Q2 forman un par diferencial polarizado con corriente constante I. Q3 y Q4 forman el circuito de carga en donde los transistores están conectados en una configuración espejo de corriente. La salida se toma asimétrica del colector de Q2.

Esta misma configuración se utiliza con transistores MOSFET que a diferencia del caso del BJT, donde la ganancia es independiente del valor de la corriente de polarización, la ganancia del amplificador MOSFET es inversamente proporcional a \sqrt{I} . Por esto podemos inferir que la ganancia aumenta a medida que se reduce la corriente. Al poner la misma corriente de polarización en el transistor BJT y en el transistor MOS vemos que I , g_m es mucho menor que la del BJT y como, además, el valor de V_A , y de manera correspondiente la r_o del BJT, es mayor que el del MOSFET (para el cual V_A es típicamente de 20 V), la ganancia intrínseca de la etapa del MOSFET suele ser un orden de magnitud

más bajo que la del amplificador con BJT. El amplificador MOSFET, sin embargo, tiene la ventaja de una resistencia de entrada prácticamente infinita.

Otra configuración a utilizar es la BiCMOS que es la combinación de la tecnología de circuito bipolar y CMOS y permite utilizar cada uno de la funciones de circuito para las que está mejor adaptado. Esta tecnología es útil en el diseño de chips analógicos y digitales así como chips que combinan circuitos analógicos y digitales. Algo que podremos visualizar es la respuesta en frecuencia de un amplificador diferencial, que tiene como parámetros los capacitores internos del transistor. Teniendo claros estos concepto se realizará la comprobación de cada uno de ellos de manera práctica, para tener un aprendizaje completo referente al tema de los amplificadores diferenciales con carga activa y otros tipos de fuentes de corrientes.

II. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE AMPLIFICADORES DIFERENCIALES CON CARGA ACTIVA Y OTROS TIPOS DE FUENTE DE CORRIENTE

En el laboratorio se montó una serie de circuitos con el fin de complementar los conceptos que se manejaron en clase, para esto se hizo uso de 4 esquemáticos los cuales consistían en una fuente Espejo de Corriente Básica con Compensación en las Bases, una Fuente de Corriente Wilson, un Amplificador Diferencial con Carga Activa Utilizando Transistores BJT y un Amplificador Diferencial BiCMOS.

A. Fuente de Corriente Básica con Compensación en la Base

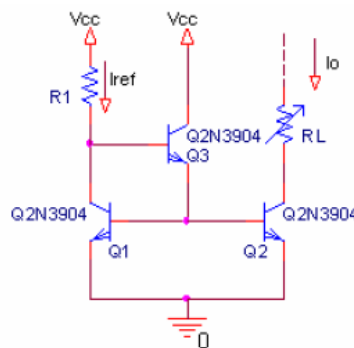


Fig 1: Fuente de corriente básica mejorada.

Para montar este esquemático se hizo uso de 3 transistores 2N3904, una resistencia de $10K\Omega$ en serie con un potenciómetro de $100K\Omega$ equivalente a R_1 , y una resistencia de carga R_L la cual estaba compuesta de 5 resistencias en serie de $1.5K\Omega$, $1.5K\Omega$, $10K\Omega$, $10K\Omega$ y $20K\Omega$, colocadas en ese orden en el colector para ver el comportamiento de la corriente de espejo con respecto a variaciones de carga. En la siguiente tabla se observan los datos relevantes de esta práctica, resaltando el hecho de que se tomaron 3 corrientes de referencia diferentes, para poder ver el comportamiento de la fuente con respecto a cambios en R_L aumentando cada vez su valor.

I_{ref} (mA)	R_1 calculado $K\Omega$	R_1 experimental $K\Omega$	R_L $K\Omega$	I_o (mA)
1.3	9	11.13k	0	1.99
			1.5	1.9
			3	1.79
			13	1.29
			23	0.74
1	13.6	13.53	43	0.39
			0	1.42
			1.5	1.39
			3	1.35
			13	1.21
0.5	27.2	27.3	23	0.74
			43	0.41
			0	0.628
			1.5	0.617
			3	0.628
			13	0.6
			23	0.57
			43	0.393

Tabla 1: Tabla de datos tomados.

Como podemos ver en la tabla la corriente de referencia inicialmente es un poco menor que la corriente I_o , esto se debe muy seguramente a una diferencia en el área base emisor, en donde el área del transistor por donde pasa I_o es un poco mayor que la del transistor donde pasa la corriente de referencia.

Otro caso que vale la pena señalar es la disminución drástica que sufre la corriente al aumentar R_L , pero esto con un pequeño análisis se puede explicar; la razón es que cuando R_L aumenta, debería seguir pasando la misma corriente, para esto el voltaje del colector disminuye conforme al aumento de R_L , pero llega un momento en que esta resistencia es tan grande que para que circule la misma corriente, el voltaje en el colector por donde pasa I_o debe ser tan negativo que supera el voltaje de la fuente de alimentación, y el voltaje allí sólo llegará hasta $-V_{EE}$ que sería la polarización de la fuente de corriente; esto a su vez ocasiona que para valores de corriente que requiera un voltaje menor que $-V_{EE}$ por la imposibilidad de hacer esta acción tendríamos que la corriente I_o disminuiría hasta llegar a ser un valor ínfimo casi cero.

B. Fuente de Corriente Wilson

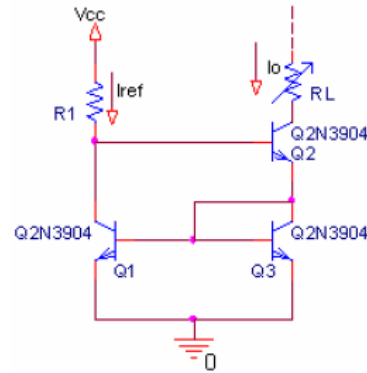


Fig 2: Fuente de corriente Wilson

Como se puede observar, el montaje de la Fuente de Corriente Wilson, fue muy parecido al mostrado en el inciso anterior, en donde la variación estuvo en la forma del espejo, pero el principio siguió siendo el mismo en cuanto a probar la variación de I_o con respecto a una serie de variaciones en R_L , para lo que se simuló R_L como resistencia de $1.5K\Omega$, $1.5K\Omega$, $10K\Omega$, $10K\Omega$ y $20K\Omega$ en serie que iban a ir aumentando y sumándose en ese mismo orden, para ello se tomaron 3 valores de prueba de la corriente de referencia, los datos más significativos de la prueba se muestran a continuación:

I_{ref} (mA)	R_1 calculado $K\Omega$	R_1 experimental $K\Omega$	R_L $K\Omega$	I_o (mA)
1.52	9	11.13k	0	1.60
			1.5	1.64
			3	1.59
			13	1.16
			23	0.73
1	13.6	13.53	43	0.37
			0	1.17
			1.5	0.97
			3	0.95
			13	0.92
0.5	27.2	27.3	23	0.68
			43	0.38
			0	0.57
			1.5	0.53
			3	0.49
			13	0.47
			23	0.44
			43	0.35

Tabla 2: Datos tomados de la fuente de corriente Wilson.

De la tabla se puede observar cómo la relación entre la corriente que pasa por la carga y el tamaño de ésta, genera la necesidad de un aumento en la caída de potencial de la resistencia lo cual ocasiona una cota mínima para que la corriente siga manteniéndose constante, pero ahora ésta estará definida por $0V$ y no por la polarización negativa de la fuente como era en el caso de la Fuente de Espejo Compensada en las Bases.

Gracias a los análisis hechos en este inciso y en el anterior podemos ver como es muy útil tener un espejo de corriente en la fuente de corriente de polarización de un par diferencial ya que tendríamos una corriente constante que a diferencia de una resistencia tendría una gran grado de inmunidad con respecto a el Voltaje Térmico y a variaciones de voltaje en la

unión base emisor.

C. Amplificador Diferencial con Carga Activa Utilizando Transistores BJT

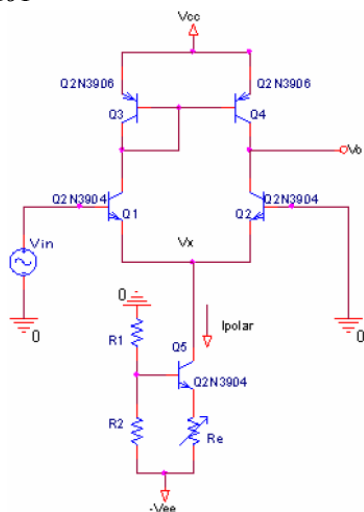


Fig 3: Amplificador diferencial con carga activa usando BJT's.

Esta práctica consto de 2 circuitos básicos, un par diferencial BJT, y un circuito el cual utilizaríamos como fuente de corriente y que básicamente estaba compuesto por un BJT con polarización de 2 fuentes con VCC a tierra. Esto para garantizar una corriente de polarización independiente a cambios en el voltaje base emisor de alguno de los dos transistores.

El par diferencial implementado tenía en vez de resistencia de colector una fuente de corriente básica como carga, lo cual es muy bueno al momento de tener una ganancia mayor. A este par diferencial sólo se le tomaría una salida asimétrica, por lo que la ganancia sería de tipo asimétrica en este caso.

Al momento de hallar la ganancia, la señal utilizada no se pudo implementar de 1mV pico a pico, por lo que se utilizó 30mV pico a pico, esto provocó que la onda tuviera una tendencia a recortarse en el pico superior lo que produjo que la ganancia estuviera afectada por este fenómeno pero la ganancia fue tan grande, que para una onda de 30mV pico a pico se superó el valor de la polarización positiva que eran 15 V teóricamente.

Se muestran a continuación los valores de voltaje de entrada y ganancia obtenida a la salida del transistor.

Voltaje p-p de entrada (mV)	Voltaje p-p de salida (V)	Ganancia v/v	Ganancia teorica v/v
30	11.37	379	1000

Tabla 3: Mediciones y cálculos en AC del amplificador diferencial con carga activa.

El valor calculado se halló mediante el Software Proteus, el cual permitió el uso de transistores ideales en la prueba.

A continuación se muestra una imagen de la señal de salida del amplificador que se implementó. Cabe resaltar que la respuesta en frecuencia sólo afecta el amplificador en frecuencias muy altas del orden de cientos de MegaHertz, y aquí el dispositivo se comportará como un filtro paso bajas, pero esto no afecta la ganancia, por lo que no es relevante datos acerca de su respuesta en frecuencia para el estudio que se ha hecho.

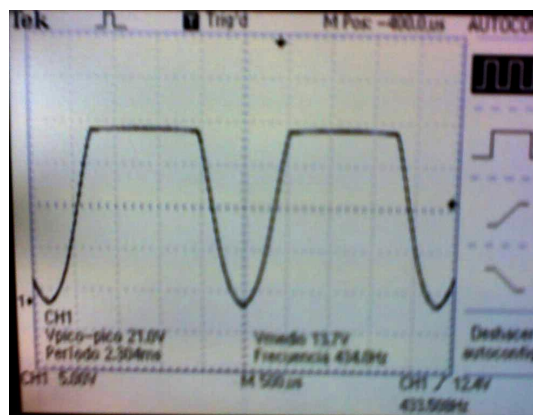


Fig 4: Señal de salida del amplificador implementado.

D. Amplificador Diferencial BiCMOS

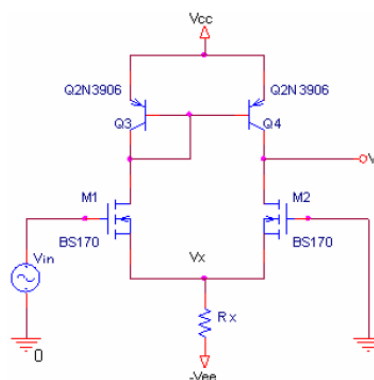


Fig 5: Amplificador diferencial BiCMOS.

Para este amplificador se llevo a cabo un proceso parecido al del inciso anterior, pero a diferencia de éste para la implementación del par diferencial se hizo uso de transistores Mosfet, por lo que la ganancia estuvo basada en la dependencia a la corriente de la fuente, mas sin embargo se presentó un problema similar al que se tuvo con el circuito anterior con respecto a la ganancia, ya que debido al no poderse obtener una onda menos a 20mV no se pudo realizar una aproximación fiable de la ganancia práctica si no un valor estimado debido a que la onda en el colector sacaba al par diferencial de región activa, ocasionando recorte en la onda de salida y distorsión así mismo.

Los datos relevantes de la ganancia obtenida se muestran en la siguiente tabla.

Voltaje p-p de entrada (mV)	Voltaje p-p de salida (V)	Ganancia v/v	Ganancia teorica v/v
30m	2.95	98.33	135

Tabla 4: Mediciones y Cálculos en el amplificador diferencial BiCMOS.

Los datos con respecto a los voltajes de base y emisor al igual que los datos acerca de la respuesta en frecuencia fueron relevantes al momento del estudio del fenómeno que realmente se presenta. Debido a la naturaleza de los transistores de Efecto De Campo FET, su ganancia de voltaje en amplificación es un poco menor que las de lo Bipolares BJT, y esto se ve evidenciado en las tablas en donde encontramos que la ganancia en el par diferencial con BJT's es considerablemente mayor, aún si se involucra el efecto no deseado del ruido al momento de obtener una onda de 1mV pico a pico, así como el desacople en los transistores.

Para la realización de la ganancia teórica se simuló el circuito en el Software Proteus, el cual nos permitió analizar los circuitos sin tener en cuenta los efectos no deseados que ocurren en la situación práctica.

A continuación se muestra una foto de la protoboard donde se hicieron los diseños prácticos de interés, cabe resaltar que fue de mucha ayuda la utilización de potenciómetros de precisión al momento de tratar de eliminar las imperfecciones de DC.

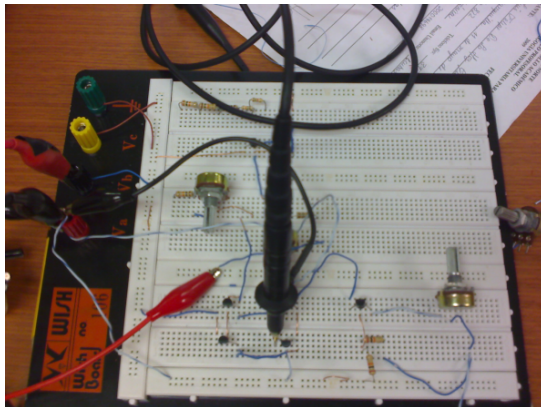


Fig 6: Foto del montaje utilizado.

III. PREGUNTAS FINALES

A. Compare cualitativa y cuantitativamente el desempeño de las dos configuraciones de amplificadores diferenciales estudiadas en la práctica. Tenga en cuenta aspectos tales como ganancia de voltaje, respuesta en frecuencia y flexibilidad de diseño.

La configuración estudiada en la figura 3, proporciona muchas ventajas ya que como bien sabemos el BJT posee una transconductancia mucho mayor, a un mismo valor de corriente de polarización; además de esto, el BJT obtiene ganancias de voltaje mucho mayores por etapa y tienen un mejor desempeño a altas frecuencias en comparación con los MOS.

Sin embargo la configuración BiCMOS estudiada en la figura 5 tiene una resistencia de entrada casi infinita de la compuerta MOSFET lo cual permite el diseño de amplificadores con resistencia de entrada extremadamente alta y corriente de polarización de entrada cercana a cero.

Comparando ambos esquemáticos de una forma más cuantitativa, hay que tener en cuenta, que un circuito que utilice sólo transistores BJT tendrá una ganancia de voltaje muy grande (de 2000V/V a 4000V/V) comparada con un circuito que posea transistores MOS cuya ganancia está en el orden de los 20 a 100V/V, esto es debido a su ganancia intrínseca dada por $A_0 = g_m r_o$.

Por otra parte, un amplificador de fuente común tiene una resistencia de entrada infinita mientras que en el caso de los BJT, esta resistencia se encuentra limitada a r_π por el valor finito de β .

B. Compare los resultados obtenidos para la implementación de amplificadores diferenciales con carga activa con los que se podrían obtener utilizando configuraciones con carga pasiva. Determine las principales ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

Cuando analizamos amplificadores diferenciales con carga activa con respecto a amplificadores de este mismo tipo pero con carga pasiva, es interesante resaltar que la resistencia vista desde los colectores de un amplificador con carga activa es sustancialmente grande en comparación con resistencias, las cuales, difícilmente logran valores de esta magnitud debido a su tolerancia. Además de esto, las resistencias ocupan áreas muy grandes y difíciles de implementar en una pastilla de silicio, lo que impediría tener todos los elementos de una configuración como esta en un circuito integrado, pero esto también tiene un gran problema y es la dificultad en el control de la ganancia, la cual es sustancialmente grande en circuitos con carga activa y un poco más controlable en circuitos con carga pasiva.

C. Explique para cada una de las fuentes de corriente estudiadas el comportamiento de la corriente de salida para cada una de las variaciones realizadas. Compare los resultados obtenidos para ambos circuitos y determine cuál tiene mejor desempeño respecto al manejo de cargas.

Como primera instancia tenemos la *fuerza de corriente básica* que presenta la desventaja en la dependencia de la corriente de salida sobre el valor β , en segundo lugar encontramos la *fuerza de corriente básica mejorada* que como su nombre lo indica lo que busca es mejorar esa dependencia que tiene la corriente de salida de la fuente de corriente básica y esto se logra conectado otro transistor entre el colector de Q1 y el nodo de interconexión de las bases de Q1 Y Q2, así en este circuito la corriente de salida reduce la dependencia de β , en tercer lugar tenemos la *fuerza de Wildar* que hace posible obtener una fuente de corriente que maneja rangos de corrientes muy bajos del orden de las unidades microamperios, y mejora la resistencia de salida, por último tenemos la *fuerza de corriente de Wilson* la cual presenta una elevada resistencia de salida pero una reducida alternancia del voltaje de salida.

Ahora bien, de las fuentes trabajadas durante la práctica, tenemos al espejo de corriente con compensación en la base, y al espejo de corriente de Wilson, los cuales tienen una ganancia de corriente igual, pero tienen la gran diferencia de que el espejo de corriente de Wilson puede proporcionar una resistencia de salida mucho mayor que la del espejo de corriente con compensación en la base, esto significa que podrá tener un mejor desempeño ante las cargas como vimos en la tabla 2, es por esto que se considera como mejor configuración **la fuente de corriente de Wilson**.

D. Explique brevemente las estrategias que utilizó para realizar las diferentes mediciones mediante el uso de los diferentes instrumentos de medición, enfocándose principalmente en la introducción de errores por parte de los mismos y la manera cómo manejó esta situación. Mencione además problemas relacionados con el funcionamiento del circuito y la solución que utilizó para sobrellevarlos.

Inicialmente se contó con un gran problema causado por parte de los transistores BJT debido a su diferencia en las uniones base-emisor de los mismos, pero se contó con un multímetro el cual fue de gran ayuda ya que contaba con la posibilidad de medir el β de los transistores, por lo que las diferencias entre estos dispositivos era de $\Delta\beta = \pm 10$ entre los transistores, esto facilitó en gran medida los problemas en cuanto a las medidas realizadas con los instrumentos.

Otro problema con el que se contó fue provocado por la onda pico-pico obtenida del generador de señales, ya que ésta estaba entre los cientos de mili voltios lo cual ocasionó saturación en los transistores utilizados en el par diferencial. Para remediar este problema, se utilizó un divisor de tensión constituido de una resistencia de $330\text{k}\Omega$ y un potenciómetro variable, con el cual se logró disminuir el voltaje pico-pico de la onda en un nivel de 20mV pico-pico, voltaje al cual seguía saturando la salida diferencial de la configuración implementada, ya que para voltajes menores, el voltaje suministrado por el generador se caía súbitamente y el ruido encontrado en las puntas del osciloscopio aunque era de naturaleza aleatoria se comportaba como una señal que tenía una amplitud mayor a 5mV , y con un voltaje de esta magnitud, ya estaríamos en saturación con ambos transistores.

En cuanto a las fuentes de corriente no se tuvo mucho énfasis en cuanto al área base-emisor de los transistores, ya que nos pareció fundamental ver además de las características de los espejos, notar que cuando ésta área es mayor o menor una respecto a la otra, la corriente que circulaba por el de mayor área sería mayor en proporción a la relación entre su base y la del otro transistor, resultado que resultó interesante para el estudio de esta configuración.

IV. CONCLUSIONS

In circuit design, an active load is a circuit component made up of active devices such as transistors.

Biasing in IC utilizes current sources. Typically an accurate and stable reference current is generated and then replicated to provide bias currents for the various amplifier stages on the chip.

The amplifiers employ also constant current sources in place of the resistances R_c that connect the collector to the power supply. These active loads enable the realization of reasonably large voltage gains while using low voltage supplies (as low as 1V or so).

The differential pair or differential amplifier configuration is the most widely configuration used as a building block in analog IC design. The input stage of any operational amplifier is a differential amplifier, this configuration is preferred for two reasons in fact: The differential amplifiers are insensitive to interference and they also don't need bypass and coupling capacitors.

For a bipolar pair biased by a current source I each device operates at a collector current of $\frac{I}{2}$ (Assuming $\alpha = 1$).

A popular circuit in bipolar analog ICs is the current mirror loaded differential pair. It realizes a high differential gain and a low common mode gain also, as well as performing the differential to single ended conversion with no loss of gain.

Differential amplifiers are particularly useful in three applications:

1. When we have an input which has come from some distance and may have had some added interference. Using a pair of wires to send the signal we can then take the difference in potential between them as the signal and reject any 'common mode' voltages on both wires as being induced by interference.

2. In feedback arrangements we can use the second input to control the behaviour of the amplifier.

3. When we wish to combine two signals we can feed one into one transistor, and the second signal into the other.

BiCMOS circuits are a MOS and Bipolar transistors combination, each one of the two transistors types has its own distinct and unique advantages: Bipolar tech has been very useful in the design of very high quality general purpose circuit building blocks, on the other hand, CMOS circuits with its very high packing density and its suitability for both digital and analog circuits, has become the technology of choice for the implementation of VLSI-IC. But, the performance of CMOS circuits can be better if the designer has available bipolar transistor in the same IC, those ones have a high g_m and an excellent current driving capability.

Although it was difficult to test all the features of the proposed configurations by the physical difference of transistors, it also was a great help to develop this practice because many concepts of current sources and differential amplifiers with active loads were quite cleared.

V. BIBLIOGRAFIA

- [1]. SEDRA, Adel; SMITH, Kenneth. Microelectronic Circuits. 5^a Ed. Oxford University Press. New York, 2003. .
- [2]. RASHID, Muhammad. Microelectronic Circuits: Analysis and Design. PWS Publishing Company. Boston, 1999.