

# CRITERIOS DE DISEÑO DE LA FUENTE DE CORRIENTE HOWLAND

---

**OSCAR ADOLFO AGUILERA ORTIZ**

*Estudiante de Ingeniería Electrónica*

*Grupo de Investigación: CIMBIOS*

*Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones*

*Universidad Industrial de Santander*

*adolfoaguileraortiz@gmail.com*

**OSCAR JAVIER BAYONA VERGARA**

*Estudiante de Ingeniería Electrónica*

*Grupo de Investigación: CIMBIOS*

*Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones*

*Universidad Industrial de Santander*

*obayona@gmail.com*

**DAVID ALEJANDRO MIRANDA MERCADO**

*Físico e Ingeniero con Maestría en Ingeniería, Área, Ingeniería Electrónica*

*Profesor Tiempo Completo*

*Grupo de Investigación: CIMBIOS*

*Escuela de Física*

*Universidad Industrial de Santander*

*dalemir@uis.edu.co, davidmiranda@tux.uis.edu.co*

*Fecha Recepción: 05/03/2007*

*Fecha Aceptación: 28/05/2007*

## RESUMEN

Se presenta el análisis teórico de la fuente de corriente Howland con el fin de suministrar un criterio para la selección de los componentes pasivos y activos que la conforman. La metodología de estudio de la fuente de corriente Howland se hace en cuatro partes, primero se analiza el circuito en condiciones ideales, amplificador operacional ideal, segundo, se analizan los efectos de la ganancia finita de lazo abierto y ancho de banda finito de amplificador operacional. Tercero, se determinan y explican unos criterios para el diseño de una fuente de corriente Howland, y por último, se presenta un ejemplo numérico en el que se emplea un amplificador de *Analog Devices*.

**PALABRAS CLAVE:** Amplificador operacional., corriente, fuente de corriente, Howland, diseño.

## ABSTRACT

It is presents the theoretical analysis of the source of Howland current with the purpose of providing a criterion for the selection of the passive and active components that conform it. The methodology to study the Howland current source are divided in fourth parts, first, the circuit is analyzed over ideal conditions, ideal operational amplifier. Second, the finite open loop gain and finite band wide effects are studied. Third, some design criteria to design a Howland current source are determined and explained. Finally, a numerical example with an Analog Device amplifier is presented.

**KEYWORDS:** Operational amplifier, current, current source, Howland, design.

## INTRODUCCIÓN

En diversos campos de la ciencia como la biomedicina, la física del estado sólido, la geofísica, entre otros, se estudian propiedades eléctricas de los materiales. Una técnica cada vez es más empleada para caracterizar diversos materiales es la espectroscopia de impedancia eléctrica, que estudia el comportamiento de la impedancia eléctrica del material en el dominio de la frecuencia. La manera en que se mide el espectro de impedancia eléctrica consiste en inyectar corriente a un material y medir la respuesta en tensión del mismo, para lo cual se requiere de una fuente de corriente.

En el diseño de un equipo para la medición de propiedades eléctricas de materiales, excitación determinados medios por estímulos de corriente, algunas aplicaciones biomédicas, y otros tantos más, es necesario contar con una fuente de corriente que tenga una alta impedancia de salida y que presente una apropiada respuesta en frecuencia junto con una estabilidad ante posibles oscilaciones.

Existen varias topologías de fuentes de corriente tales como la fuente de corriente Howland, amplificador inversor de transconductancia, amplificador no inversor de transconductancia, la fuente de corriente basada en espejo de corriente (*the current-mirror current source*), entre otras. De las fuentes de corriente anteriormente enumeradas, la fuente Howland y el espejo de corriente tienen un buen desempeño y no presentan una gran diferencia en su comportamiento, según reporta Pedro Bertemes Filho en su tesis doctoral "*Tissue Characterisation using an Impedance Spectroscopy Probe*" [1]. La diferencia entre estas dos radica en el número de amplificadores operacionales que conforman cada topología: la fuente de corriente Howland utiliza sólo un amplificador operacional mientras que la fuente de corriente espejo de corriente utiliza tres.

Se han desarrollado múltiples aplicaciones que involucran en uso de una fuente de corriente Howland, tales como la detección temprana de cáncer de cuello uterino [8], tomografía de impedancia eléctrica [5], estimulación electro-cutánea [6], excitación de sensores resistivos y piezoresistivos [7]. Hasta el momento no se ha reportado un análisis a profundidad de la fuente de corriente Howland que tenga en cuenta la ganancia de lazo abierto y el ancho de banda del amplificador operacional. Cabe anotar que en el diseño de una fuente de corriente Howland una de las mayores limitaciones es la correcta selección del amplificador operacional con que se implementará. Esta selección se simplifica si se definen criterios de diseño que involucren las características no ideales del amplificador operacional.

A continuación se presenta el análisis de la fuente de corriente Howland con amplificador operacional ideal, los efectos de la ganancia finita de lazo abierto y el ancho de banda finito. Además, se determinan y explican unos criterios para el diseño de una fuente de corriente Howland, y se presenta un ejemplo de diseño.

## 1. ANÁLISIS MATEMÁTICO DE LA FUENTE DE CORRIENTE HOWLAND

### 1.1. FUENTE DE CORRIENTE HOWLAND CON AMPLIFICADOR OPERACIONAL IDEAL

La fuente de corriente Howland usa un amplificador operacional con realimentación inversora y no inversora, como se muestra en la figura 1 [2]. La corriente de salida en función de la tensión de entrada es

$$I_L = -\frac{Z_2 Z_4}{Z_1 Z_2 Z_3 + Z_L (Z_1 Z_3 - Z_2 Z_4)} V_I \quad (1)$$

si  $Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4$  y  $Z_4 = Z_1$ , entonces

$$I_L = -\frac{1}{Z_3} V_I \quad (2)$$

La ecuación 2 muestra que la corriente de la fuente Howland es independiente de la impedancia de la carga.

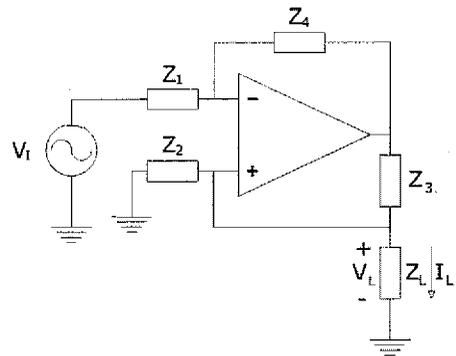


Figura 1. Fuente de corriente Howland.

La resistencia de salida del circuito de la figura 1 y encontrada por medio del circuito de la figura 2, esta dada por

$$Z = \frac{V_x}{I_x} = \frac{Z_1 Z_2 Z_3}{Z_1 Z_3 - Z_2 Z_4} \quad (3)$$

como  $Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4$ , entonces

$$Z_{out} \rightarrow \infty \quad (4)$$

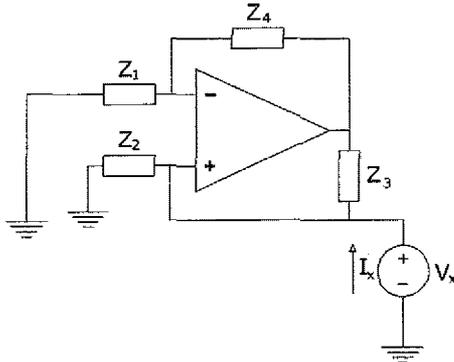


Figura 2. Configuración de la fuente de corriente Howland para hallar la resistencia de salida.

**1.2 FUENTE DE CORRIENTE HOWLAND MEJORADA CON AMPLIFICADOR OPERACIONAL IDEAL**

La fuente de corriente Howland mejorada, mostrada en la figura 3, agrega una impedancia en la realimentación no inversora, con el fin de suministrar sólo una fracción de la tensión en la carga a la impedancia  $Z_2$ , disminuyendo la tensión en modo común. A su vez se incrementa la corriente que se le puede suministrar a la carga y así aumentar el rendimiento de la fuente de corriente [1].

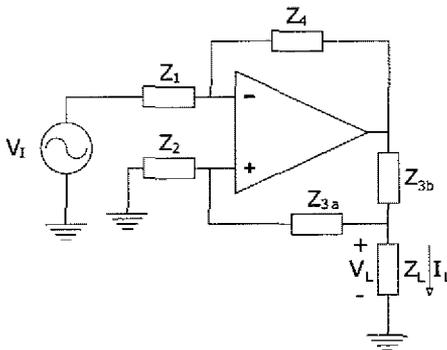


Figura 3. Fuente de corriente Howland mejorada.

El análisis del circuito de la fuente de corriente Howland mejorada mostrado en la figura 3, muestra que la corriente de salida en función de la tensión de entrada es

$$I_L = - \frac{Z_4(Z_2 + Z_{3a})}{Z_1 Z_{3b}(Z_2 + Z_{3a}) + Z_L(Z_1 Z_{3a} + Z_1 Z_{3b} - Z_2 Z_4)} V_I \quad (5)$$

Partiendo del análisis hecho en las ecuaciones 1 y 2, suponiendo que  $Z_4 = Z_1$ , entonces

$$I_L = - \frac{Z_2 + Z_{3a}}{Z_{3b}(Z_2 + Z_{3a}) + Z_L(Z_{3a} + Z_{3b} - Z_2)} V_I \quad (6)$$

si  $Z_2 = Z_{3a} + Z_{3b}$ , entonces

$$I_L = - \frac{1}{Z_{3b}} V_I \quad (7)$$

La ecuación (7) Esto muestra que la corriente de salida de la fuente de corriente Howland mejorada es independiente de la impedancia de la carga.

La resistencia de salida de la fuente de corriente Howland mejorada de la configuración del circuito mostrado en la figura 3 y hallada por medio del circuito de la figura 4, es

$$Z_{out} = \frac{V_x}{I_x} = \frac{Z_1 Z_{3b}(Z_2 + Z_{3a})}{Z_1 Z_{3a} + Z_1 Z_{3b} - Z_2 Z_4} \quad (8)$$

como  $Z_4 = Z_1$ , entonces

$$Z_{out} = \frac{Z_{3b}(Z_2 + Z_{3a})}{Z_{3a} + Z_{3b} - Z_2} \quad (9)$$

y si  $Z_2 = Z_{3a} + Z_{3b}$ , entonces

$$Z_{out} \rightarrow \infty \quad (10)$$

El análisis de la resistencia de salida ratifica la definición de fuente de corriente, en donde la resistencia de salida de una fuente de corriente ideal es infinita.

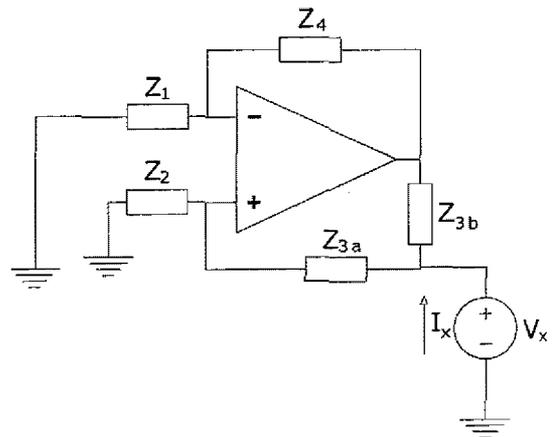


Figura 4. Configuración de la fuente de corriente Howland mejorada para hallar la resistencia de salida.

**1.3 FUENTE DE CORRIENTE HOWLAND MEJORADA TENIENDO EN CUENTA LA GANANCIA DE LAZO ABIERTO Y EL ANCHO DE BANDA DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL**

Hasta el momento solo se ha analizado la fuente de corriente Howland con el amplificador operacional ideal, ahora se incluirá en el análisis la ganancia de lazo abierto

y el ancho de banda del amplificador operacional en la configuración de un polo. La figura 5 muestra la fuente de corriente Howland mejorada indicando las nuevas consideraciones, en donde

$$V_o = \frac{A_v}{1 + j \frac{\omega}{\omega_b}} V_d$$

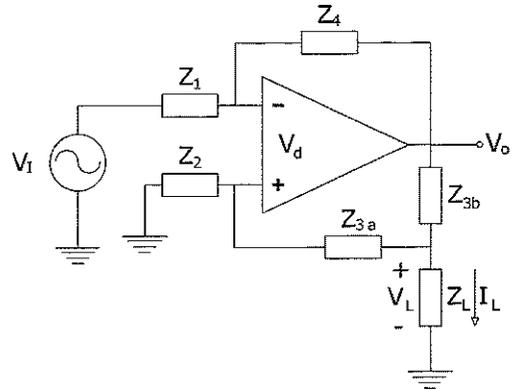


Figura 5. Fuente de corriente Howland mejorada considerando cuenta la ganancia de lazo abierto y el ancho de banda del amplificador operacional.

La corriente de salida en función de la tensión de entrada, teniendo en cuenta que para simplificar el análisis

$$Z_4 = Z_1 \text{ y } A = \frac{A_v}{1 + \frac{s}{\omega_b}}, \text{ donde } s = j\omega, \text{ es:}$$

$$I_L = - \frac{Z_2 + Z_{3a}}{Z_{3b}(Z_2 + Z_{3a}) + Z_L(Z_{3a} + Z_{3b} - Z_2) + \frac{2}{A} [Z_{3b}(Z_L + Z_2 + Z_{3a}) + Z_L(Z_2 + Z_{3a})]} V_I \quad (11)$$

si  $Z_2 = Z_{3a} + Z_{3b}$ , entonces

$$I_L = - \frac{2Z_{3a} + Z_{3b}}{Z_{3b}(2Z_{3a} + Z_{3b}) + \frac{2}{A} [Z_{3b}(Z_L + 2Z_{3a} + Z_{3b}) + Z_L(2Z_{3a} + Z_{3b})]} V_I \quad (12)$$

En la anterior ecuación se puede observar que si  $A_v \rightarrow \infty$  y  $\omega_b \rightarrow \infty$ , por lo tanto  $A \rightarrow \infty$ , el resultado de la corriente que suministra la fuente Howland es igual al de la ecuación (7), o sea

$$I_L = - \frac{1}{Z_{3b}} V_I \quad (13)$$

Reescribiendo la ecuación (12) de la forma

$$G(s) = \frac{I_L}{V_I} = \frac{G_H}{1 + \frac{s}{\omega_H}}$$

y suponiendo que todas las impedancias son puramente resistivas, en donde  $Z_{3a} = R_{3a}$ ,  $Z_{3b} = R_{3b}$  y  $Z_L = R_L$ , se obtiene:

$$G_H = - \frac{(2R_{3a} + R_{3b})A_v}{(R_{3b}A_v + 2R_L)(2R_{3a} + R_{3b}) + 2R_{3b}(R_L + 2R_{3a} + R_{3b})} \quad (14)$$

$$\omega_H = \frac{\omega_b (R_{3b}A_v + 2R_L)(2R_{3a} + R_{3b}) + 2R_{3b}(R_L + 2R_{3a} + R_{3b})}{2 R_{3b}(R_L + 2R_{3a} + R_{3b}) + R_L(2R_{3a} + R_{3b})} \quad (15)$$

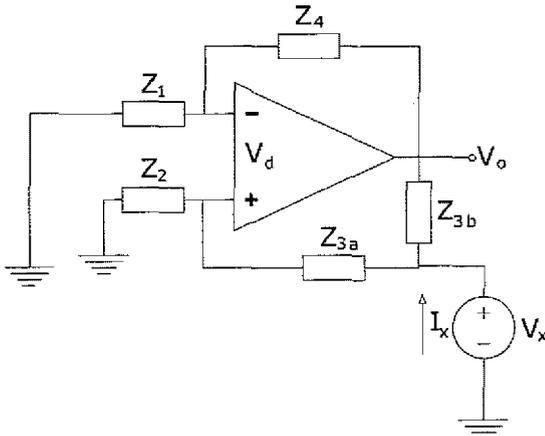


Figura 6. Configuración de la fuente de corriente Howland mejorada considerando cuenta la ganancia de lazo abierto y el ancho de banda del amplificador operacional para hallar la resistencia de salida.

en donde se muestra que  $G_H$  es la ganancia de transconductancia de corriente continua y  $\omega_H$  es ancho de banda de la fuente corriente Howland mejorada.

La resistencia de salida de la fuente de corriente Howland mejorada del circuito de la figura 5 considerando que  $Z_4 = Z_1$ , la ganancia de lazo abierto y el ancho de banda del amplificado operacional, y hallada por medio del circuito de la figura 6, es

$$Z_{out} = \frac{V_x}{I_x} = \frac{Z_{3b}(Z_2 + Z_{3a})(A + 2)}{A(Z_{3a} + Z_{3b} - Z_2) + 2(Z_{3a} + Z_{3b} + Z_2)} \quad (16)$$

Si  $Z_2 = Z_{3a} + Z_{3b}$  se reemplaza en la ecuación (16), se tiene que

$$Z_{out} = \frac{Z_{3b}(2Z_{3a} + Z_{3b})(A + 2)}{4(Z_{3a} + Z_{3b})} \quad (17)$$

en la anterior ecuación se verifica que si  $A \rightarrow \infty$  entonces

$$Z_{out} \rightarrow \infty \quad (18)$$

La magnitud de la impedancia de salida de la fuente de corriente Howland mejorada, partiendo de la ecuación (17), teniendo en cuenta la ganancia de lazo abierto y el ancho de banda del amplificador operacional, se muestra a continuación

$$|Z_{out}| = \left| \frac{Z_{3b}(2Z_{3a} + Z_{3b})}{4(Z_{3a} + Z_{3b})} \left( \frac{A_v}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_b}\right)^2}} + 2 \right) \right| \quad (19)$$

## 2. CRITERIOS DE DISEÑO DE UNA FUENTE HOWLAND

Del análisis matemático de la fuente de corriente Howland se encuentra que los principales parámetros que deben tenerse en cuenta para el diseño de una fuente de corriente como la que se muestra en la figura 5 son:

- La ganancia de lazo abierto del amplificador operacional  $A_v$ : como muestra las ecuaciones de ganancia de transconductancia de corriente continua (14), ancho de banda (15) y magnitud de la impedancia de salida (19) de la fuente de corriente Howland mejorada.

- El ancho de banda del amplificador operacional  $\omega_b$ : como muestra las ecuaciones de ancho de banda (15) y magnitud de la impedancia de salida (19) de la fuente de corriente Howland mejorada.

De acuerdo con lo analizado en las ecuaciones (1), (11) y (16) es conveniente considerar que  $Z_4 = Z_1$  y  $Z_2 = Z_{3a} + Z_{3b}$ , adicionalmente a esto se recomienda que la impedancia  $Z_{3a}$  tenga un capacitor de acople para mejorar la estabilidad de la fuente de corriente Howland (ver apartado 3).

### 2.1 MAGNITUD DE LA RESISTENCIA DE SALIDA DE LA FUENTE DE CORRIENTE HOWLAND MEJORADA

Un criterio que facilita el diseño y mejora la impedancia de salida es que  $Z_{3a} \approx Z_{3b}$ , por lo tanto, debido a que  $Z_{3a}$  tiene una parte reactiva y se asume que la impedancia  $Z_{3b}$  es puramente resistiva, se puede suponer que

$$Z_{3a} = \alpha R_{3b} \quad (20)$$

De esta forma la ecuación (19) toma la forma

$$|Z_{out}| = \left| \frac{2\alpha + 1}{4(\alpha + 1)} R_{3b} \left( \frac{A_v}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_b}\right)^2}} + 2 \right) \right| \quad (21)$$

Dentro del ancho de banda de la fuente de corriente Howland

$$\frac{A_v}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_b}\right)^2}} \gg 2$$

de esta manera la magnitud de la resistencia de salida de la fuente de corriente Howland es

$$|Z_{out}| \approx \left| \frac{2\alpha + 1}{4(\alpha + 1)} \right| R_{3b} \frac{A_v}{\sqrt{1 + \left( \frac{\omega}{\omega_b} \right)^2}} \quad (22)$$

Si  $\alpha \rightarrow 1$  se logra cumplir con que  $Z_{3a} \approx R_{3b}$ , y así la magnitud de la impedancia de salida toma la siguiente forma

$$|Z_{out}| \approx \frac{3}{8} R_{3b} \frac{A_v}{\sqrt{1 + \left( \frac{\omega}{\omega_b} \right)^2}} \quad (23)$$

El peor caso para la magnitud de la impedancia de salida es que en la frecuencia de la fuente de tensión sinusoidal sea la frecuencia del ancho de banda del amplificador operacional  $\omega_b$ , de esta manera se tiene que la ecuación (23) toma la forma

$$|Z_{out}| \approx \frac{3}{8} \frac{A_v}{\sqrt{2}} R_{3b} \quad (24)$$

La ganancia de lazo abierto del amplificador operacional se determina a partir de la magnitud de la resistencia de salida de la fuente de corriente Howland, a continuación se muestra la condición que debe cumplir para garantizar la resistencia de salida

$$A_v \geq \frac{8\sqrt{2}}{3} \frac{|Z_{out}|}{R_{3b}} \quad (25)$$

## 2.2 ANCHO DE BANDA DE LA FUENTE DE CORRIENTE HOWLAND MEJORADA

El ancho de banda del amplificador operacional se puede conocer a partir de la ecuación (15), como  $Z_{3a} = R_{3a} \approx R_{3b}$  se tiene que

$$\omega_H \approx \frac{\omega_b}{2} \frac{3R_{3b}(A_v + 2) + 8R_L}{3R_{3b} + 4R_L} \quad (27)$$

de esta manera se tiene que la especificación del ancho de banda del amplificador operacional es

$$\omega_b \approx 2 \frac{3R_{3b} + 4R_L}{3R_{3b}(A_v + 2) + 8R_L} \omega_H \quad (28)$$

La ecuación (28) muestra que el ancho de banda del amplificador operacional es función de  $R_{3b}$ ,  $R_L$ , de la especificación del ancho de banda de la fuente de corriente y de la ganancia de lazo abierto del amplificador operacional.

El mayor requerimiento para el ancho de banda del amplificador operacional es cuando la resistencia de carga toma su mayor valor.

## 2.3 OTROS PARÁMETROS NO IDEALES DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL

### 2.3.1 Slew Rate (SR)

Velocidad de respuesta del amplificador operacional, como se muestra a continuación

$$\left| \frac{dv_o}{dt} \right| \leq SR \quad (29)$$

donde  $v_o$  es la tensión de salida del amplificador operacional. Si la tensión de salida viene dada de la forma  $v_o = V_{o\max} \text{sen}(\omega t)$ , se obtiene que el slew rate es

$$SR = \omega V_{o\max} \quad (30)$$

Despejando la frecuencia

$$\omega_{FP} = \frac{SR}{V_{o\max}} \quad (31)$$

donde  $\omega_{FP}$  es la máxima frecuencia de la tensión a la salida que no presenta distorsión por velocidad de respuesta del amplificador operacional [2].

### 2.3.2 Porcentaje de Distorsión Armónica Total (THD)

La distorsión armónica es consecuencia de la no linealidad de los microcircuitos que conforman el amplificador operacional. El porcentaje de distorsión armónica total se calcula por medio de la siguiente ecuación

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} A_n^2}}{A_1} \quad (32)$$

donde  $A_1$  es la amplitud pico de la señal de frecuencia fundamental ( $\omega_0$ ) y  $A_n$  es la amplitud pico de la señal de frecuencia del respectivo armónico ( $n\omega_0$ ) [4].

### 2.3.3 Corriente de Polarización de Entrada ( $I_B$ )

Las terminales de entrada del amplificador operacional deben estar alimentadas con corriente de continua para que funcione correctamente [3]. Un criterio de selección es

$$I_B = \frac{I_{L\max}}{100} \quad (33)$$

donde  $I_{L\max}$  es la máxima corriente de la fuente de corriente Howland.

### 2.3.4 Tensión de Offset ( $V_{OS}$ )

El voltaje de desnivel aparece por los desacoplamientos

presentes en la etapa de entrada diferencial del amplificador, debido a esto la tensión de Offset se amplifica a la salida del amplificador por el factor de amplificación de lazo cerrado de la configuración. Por esta razón es necesario determinar cuales son los niveles de señal deseada a la salida y de acuerdo el factor de amplificador seleccionar la máxima tensión de Offset de amplificador operacional que no afecte de forma significativa la señal de salida [3].

**2.3.5 Densidad Espectral de Ruido**

El ruido es inherente a los dispositivos electrónicos, por lo tanto es importante seleccionar un amplificador operacional que cumpla la siguiente condición

$$\int_{\Delta\omega} I_{ND}^2 d\omega \ll I_L \quad (34)$$

donde  $I_{ND}$  es la densidad espectral de ruido de corriente y  $I_L$  es la corriente de la carga.

**3. MEJORA DE LA ESTABILIDAD EN AC DE LA FUENTE DE CORRIENTE HOWLAND MEJORADA**

Anteriormente se menciona que para mejorar la estabilidad de la fuente de corriente de Howland se recomienda que la impedancia  $Z_{3a}$  tenga un capacitor de acople, en donde

$$Z_{3a} = R_{3a} + \frac{1}{s}C_{3a} \quad (35)$$

de esta manera la función de transferencia de la fuente de corriente Howland de la ecuación (11) toma la forma de un sistema de segundo orden de siguiente forma

$$G(s) = \frac{I_L}{V_I} = \frac{a_1s + a_0}{s^2 + s\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2} \quad (36)$$

$Z_L = R_L$ , de acuerdo con lo analizado en el apartado 2 es conveniente suponer que

$$Z_4 = Z_1 = R, Z_{3a} = R + \frac{1}{s}C, Z_{3b} = R, Z_2 = 2R \text{ y}$$

se tiene que

$$a_1s + a_0 = \frac{A_v\omega_b}{2RC(4R_L + 3R)}(3RCs + 1) \quad (37)$$

$$\frac{\omega_0}{Q} = \frac{\omega_b}{2RC(4R_L + 3R)} \left( 3A_vR^2C + 2RC(4R_L + 3R) + 2\frac{R + R_L}{\omega_b} \right) \quad (38)$$

$$\omega_0^2 = \frac{\omega_b(A_v + 2)(R + R_L)}{2RC(4R_L + 3R)} \quad (39)$$

$$a_0 \approx 0 \quad (40)$$

$$a_1 \approx \frac{3}{2} \frac{A_v\omega_b}{4R_L + 3R} \quad (41)$$

$$\frac{\omega_0}{Q} \approx \frac{3}{2} \frac{A_v\omega_bR}{4R_L + 3R} \quad (42)$$

$$\omega_0^2 \approx \frac{A_v\omega_b(R + R_L)}{2RC(4R_L + 3R)} \quad (43)$$

Con lo analizado anteriormente se puede suponer en la ecuación (37) que  $3RCs \gg 1$ , y que en la ecuaciones (38) y (39) el sumando que tiene como factor  $A_v$  es mucho

$$G(s) \approx \frac{a_1s}{s^2 + s\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2} \quad (44)$$

$$G_{HC} = \frac{a_1Q}{\omega_0} \quad (45)$$

$$\omega_1, \omega_2 = \omega_0 \sqrt{1 + \frac{1}{4Q^2} \mp \frac{\omega_0}{2Q}} \quad (46)$$

mayor que los demás, de esta manera los coeficientes del sistema se simplifican a:

Esto aproxima la función de transferencia de la fuente de corriente Howland al siguiente sistema de segundo orden

donde  $\omega_0$  es la frecuencia central,  $G_{HC}$  es la ganancia de frecuencia central y  $\omega_1, \omega_2$  son las frecuencias de en donde la ganancia de frecuencia central cae en 3 dB, por lo tanto el ancho de banda de la fuente de la fuente esta definido por  $\frac{\omega_0}{Q}$  [3].

De la ecuación (42) se puede determinar el ancho de banda del amplificador operacional de la siguiente manera

$$\omega_b \approx \frac{2}{3} \frac{4R_L + 3R}{A_vR} \frac{\omega_0}{Q} \quad (47)$$

Una vez definido  $\omega_b$  se puede seleccionar el valor del capacitor  $C$ , para determinada frecuencia de corte, por medio de la ecuación (46).

### 4. EJEMPLO NUMÉRICO

Se desea diseñar una fuente de corriente Howland con un ancho de banda de 2 MHz, resistencia de salida de 10 MΩ y máxima resistencia de carga de 1 kΩ.

#### 4.1 FUENTE DE CORRIENTE HOWLAND SIN GARANTIZAR ESTABILIDAD EN AC

Para esto se maneja la misma suposición hecha para el desarrollo de las ecuaciones (11), (14), (15), (25) y (28), para simplificar se supone que  $Z_{3b} = R$ , esto significa que  $Z_4 = Z_1 = R$ ,  $Z_{3a} = R$ ,  $Z_2 = 2R$  y  $Z_L = R_L$ . De acuerdo a lo analizado en la ecuación (25) para disminuir el requerimiento de la ganancia de lazo abierto del amplificador operacional se selecciona una resistencia alta,  $R = 100 \text{ k}\Omega$ , teniendo en consideración que la selección de una resistencia muy alta genera ruido térmico que es mas apreciable. Reemplazando  $R = 100 \text{ k}\Omega$  en la ecuación (25) se tiene

$$A_v \geq \frac{8\sqrt{2}}{3} \frac{10 \text{ M}\Omega}{100 \text{ k}\Omega} \approx 377.124$$

y luego en la ecuación (28) se tiene

$$\omega_b \approx 2 \frac{300 \text{ k}\Omega + 4 \text{ k}\Omega}{300(377.124 + 2) \text{ k}\Omega + 8 \text{ k}\Omega} (2\pi * 2) \text{ M rad/s}$$

$$\omega_b \approx 67.171 \text{ k rad/s}$$

Con los resultados de ganancia de lazo abierto,  $A_v$ , y ancho de banda del amplificador,  $\omega_b$ , se encuentra el producto ganancia por ancho de banda del amplificador operacional mínimo requerido, dando como resultado

$$A_v f_b = A_v \frac{\omega_b}{2\pi} \approx 4.03 \text{ MHz}$$

Se selecciona el circuito integrado AD744 de Analog Devices que especifica el producto ganancia por ancho de banda como  $A_v f_b \approx 13 \text{ MHz}$ , cumpliendo con el requerimiento y los parámetros no ideales de amplificador operacional como se mencionó en el apartado (2.3).

La simulación en MATLAB de la ecuación (11) con los parámetros anteriormente encontrados y con  $V_i = 1 \text{ V}$  se muestra en la figura 7. El ancho de banda obtenido de la fuente de corriente Howland es de 7.88 MHz, este resultado es mucho mejor del esperado y se debe a las especificaciones del AD744 son mejores con respecto a los criterios de selección.

También se genero el comportamiento de la fuente de corriente howland en un software especializado en

simulación de circuitos, la figura 8 muestra el resultado y se obtiene como ancho de banda 7.76 MHz.

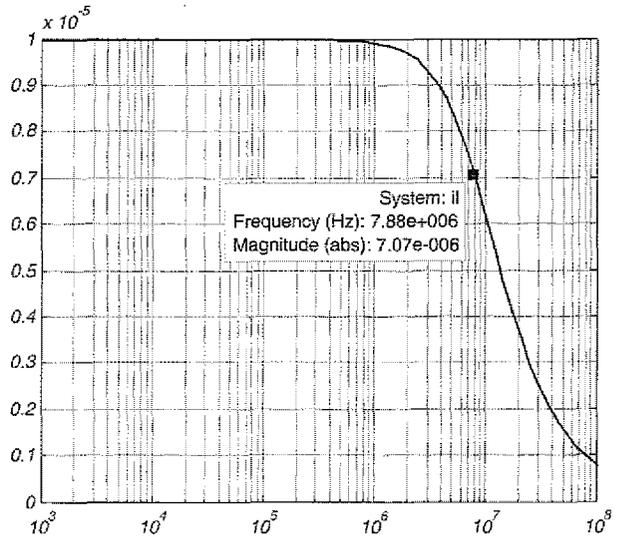


Figura 7. Respuesta en frecuencia de la fuente de corriente Howland simulada en MATLAB y con el AD744 como amplificador operacional.

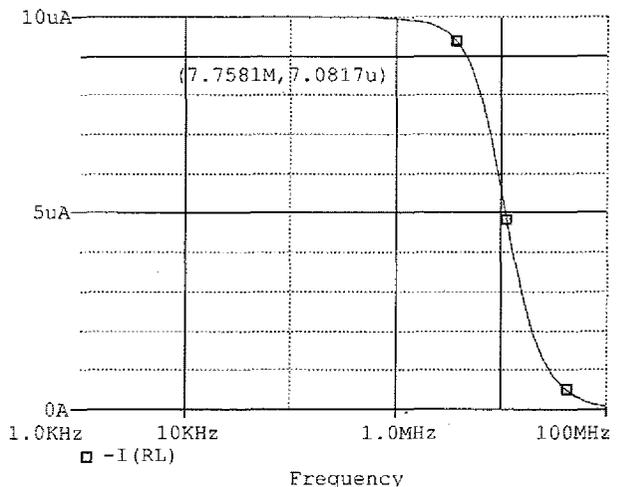


Figura 8. Respuesta en frecuencia de la fuente de corriente Howland simulada en el software especializado y con el AD744 como amplificador operacional.

#### 4.2 FUENTE DE CORRIENTE HOWLAND CON MEJORA EN LA ESTABILIDAD AC

Partiendo de lo tratado en el apartado 3, del análisis de la impedancia  $Z_{3b}$ , se selecciona de igual forma que en punto anterior a  $R = 100 \text{ k}\Omega$ , y del análisis de la magnitud de la impedancia de salida de la ecuación (25), se tiene que

$$A_v \geq \frac{8\sqrt{2}}{3} \frac{10 \text{ M}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} \approx 377.124$$

Con este valor y como el ancho de banda requerido para la fuente de corriente que es

$$2\pi * 2 M \text{ rad/s}$$

se tiene que el ancho de banda de amplificador operacional es

$$\omega_b \approx \frac{2}{3} \frac{4 \text{ k}\Omega + 300 \text{ k}\Omega}{377.124 * 100 \text{ k}\Omega} 2\pi * 2 M \text{ rad/s} = 67.532 \text{ k rad/s}$$

El producto ganancia por ancho de banda es

$$A_v f_b = A_v \frac{\omega_b}{2\pi} \approx 4.05 \text{ MHz}$$

y nuevamente se selecciona el AD744 y se simula en MATLAB la ecuación (11) con  $V_I = 1 \text{ V}$ , la respuesta en frecuencia se muestra en la figura 9.

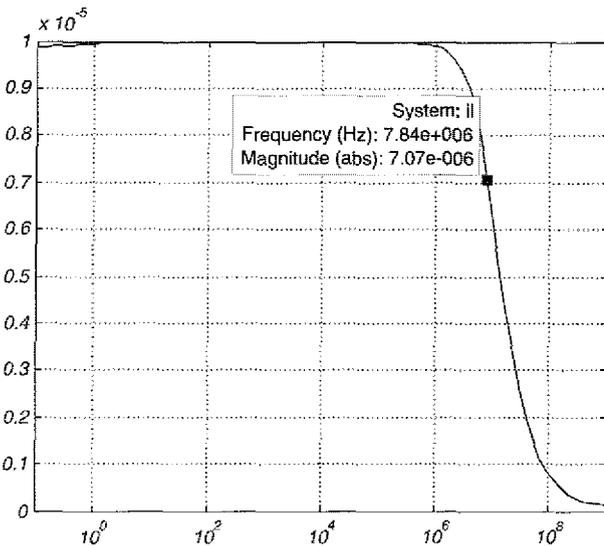


Figura 9. Respuesta en frecuencia de la fuente de corriente Howland, mejorando estabilidad, simulada en MATLAB y con el AD744 como amplificador operacional

El resultado de la respuesta en frecuencia de la fuente de corriente howland es mucho mejor del esperado, frecuencia de corta alta 7.84 MHz, debido a que los parámetros del AD744 son mejores a la especificaciones de selección. La figura 10 muestra el comportamiento de la respuesta en frecuencia de la fuente de corriente howland hallado en un software especializado en simulación de circuitos y la frecuencia de corte alta de la fuente de corriente es 7.76 MHz.

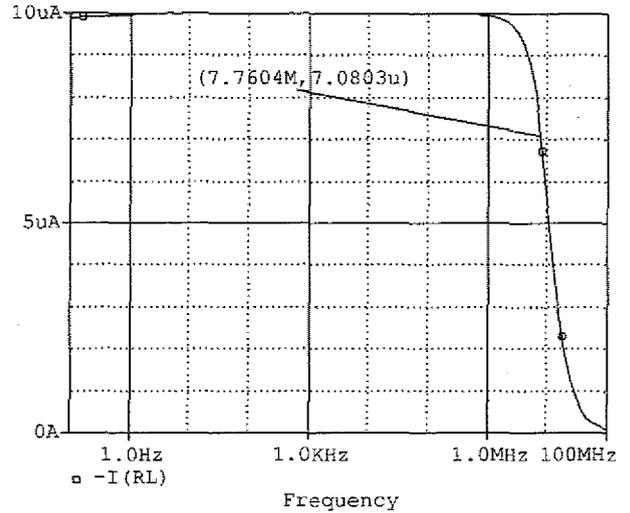


Figura 10. Respuesta en frecuencia de la fuente de corriente Howland, mejorando estabilidad, simulada en el software especializado y con el AD744 como amplificador operacional

### 5. CONCLUSIONES

Se determinaron unos criterios para el diseño de una fuente de corriente Howland que involucran características no ideales del amplificador operacional. Para el diseño de una fuente de corriente Howland requiere un análisis a profundidad de las ecuaciones que rigen el sistema. La corriente de salida y la impedancia de salida de la fuente de corriente howland dependen de ganancia de lazo abierto y de ancho de banda del amplificador operacional, como se muestra en las ecuaciones (11), (14), (15) y (19). En estas ecuaciones también se aprecia el aporte significativo que hace la impedancia de carga, que en los casos ideales es cero, ecuaciones (2), (4), (7) y (10).

El análisis de las ecuaciones (11), (14), (15) y (19), determina los criterios para el diseño de una fuente de corriente howland mejorada como la que se muestra en el circuito de la figura (5). Los criterios de diseño para la ganancia de lazo abierto del amplificador operacional se muestra en la ecuación (25), y ancho de banda del amplificador operacional el las ecuaciones (28) o (47), según se tenga en cuenta la estabilidad del sistema. Estos criterios se sometieron a prueba, en el ejemplo numérico, y los resultados obtenidos corresponden con las simulaciones, figuras (7), (8), (9) y (10).

Cabe anotar que la máxima corriente que puede generar la fuente de corriente Howland del nivel de tensión de la fuente de alimentación del amplificador operacional, y esta a su vez limita la máxima resistencia de carga a un valor dado por  $\frac{V_{taje\_Alimentacion}}{I\_Salida}$ .

$$I\_Salida$$

## REFERENCIAS

- [1] P. Bertemes Filho, "Tissue Characterisation using an Impedance Spectroscopy Probe", A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. Department of Medical Physics and Clinical Engineering, University of Sheffield. September 2002, ch 2.
- [2] A. R. Hambley. *Electrónica*, 2da ed., Ed. Prentice Hall, España, 2000, pp 117-118.
- [3] A. S. Sedra, K. C. Smith, *Circuitos Microelectrónicos*, 4ta ed., Ed. Oxford, México, 2002, pp 900-908.
- [4] L. W. Couch II, *Sistemas de comunicación digitales y analógicos*, 5ta ed., Ed. Pearson Educación, México, 1998, pp 247-248.
- [5] A. S. Ross, G. J. Saulnier, J. C. Newell, D. Isaacson, "Current source desing for impedance tomography", *Institute of physics publishing, Physiological measurement* 24, pp. 509-516, 2003.
- [6] C. J. Poletto, C. L. Van Doren, "A High Voltaje, Constant Current Stimulator for Electrocutaneous Stimulation Through Small Electrodes", *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 46, NO. 8, pp. 929-936, 1999.
- [7] M. M. Pelicia, C. A. dos Reis Filho, "Fully Integrated Programmable Howland Current Source For Sensors Excitation", *Fourth IEEE International Cracas Conference on Devices, Circuits and Systems*, pp. 1-4, 2002
- [8] MIRANDA, D, BARRERO J, ECHEVERRI J. *Estudio para la detección temprana del cáncer de cuello uterino. Bucaramanga*. Sic Editorial, 127p, 2007. ISBN: 9789587082647