

TESIS DEFENDIDA POR

Adán Sepúlveda Fierro

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

M.C. Moisés Castro Delgado

Director del Comité

M.C. Ricardo Francisco Núñez Pérez

Miembro del Comité

Dr. Enrique Mitrani Abenchuchan

Miembro del Comité

Dr. Horacio Soto Ortiz

Miembro del Comité

Dr. Héctor Manuel Escamilla Taylor

Miembro del Comité

Dr. Roberto Conte Galván

*Coordinador del programa de
posgrado en Electrónica y telecomunicaciones*

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales

Director de Estudios de Posgrado

9 de julio de 2010

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE
EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**DISEÑO Y REALIZACIÓN DE UNA FUENTE DE CORRIENTE PARA
DISPOSITIVOS OPTOELECTRÓNICOS DE SEMICONDUCTOR**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

ADÁN SEPÚLVEDA FIERRO

Ensenada, Baja California, México, julio de 2010

RESUMEN de la tesis de **ADÁN SEPÚLVEDA FIERRO**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES con orientación en INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL. Ensenada, Baja California, julio de 2010.

DISEÑO Y REALIZACIÓN DE UNA FUENTE DE CORRIENTE PARA DISPOSITIVOS OPTOELECTRÓNICOS DE SEMICONDUCTOR

Resumen aprobado por:

M.C. Moisés Castro Delgado

Director de Tesis

En el funcionamiento de los dispositivos optoelectrónicos la estabilidad de la fuente de corriente y su nivel de ruido juegan un papel primordial. Si la fuente fuera ruidosa, la salida del dispositivo optoelectrónico se vería afectada por el ruido.

En este trabajo se presenta el diseño de una fuente de corriente de bajo ruido y bajo costo a la que hemos nombrado fuente de Howland II, por estar basada en el circuito de la fuente de Howland. Para poder obtener la fuente de bajo ruido fue necesario hacer un análisis de las características y especificaciones de los componentes que la integran.

El desempeño de la fuente de Howland II se comparó con los de las fuentes de laboratorio ILX-Lightwave LDX-3620 y LDC-205. Los resultados teóricos y experimentales obtenidos en este trabajo fueron satisfactorios, pues incluso mejoró, en los niveles de corriente considerados, los niveles de ruido de las dos fuentes comerciales mencionadas.

Palabras Clave: ruido, fuente de Howland, densidad de ruido de corriente, fuente de corriente.

ABSTRACT of the thesis presented by **ADÁN SEPÚLVEDA FIERRO**, in partial fulfillment of the requirements of the degree of MASTER OF SCIENCE in ELECTRONICS AND TELECOMUNICATIONS with orientation in INSTRUMENTATION AND CONTROL. Ensenada, Baja California, July 2010.

In the operation of optoelectronic devices the stability of the current source and its noise level play a fundamental role. If the source were noisy, the output of the optoelectronic device would be affected by noise.

This work presents the design of a low noise and low priced current source known as the Howland II source because it is based on the circuit of Howland. In the design of the low noise source it was necessary to analyze the features and specifications of its components.

The performance of the Howland II source was compared against the laboratory sources ILX-Lightwave LDX-3620 and LDC-205. The theoretical and experimental results obtained with our design were satisfactory. In fact, its noise performance at the current levels considered was better than the two commercial sources mentioned above.

Keywords: noise, Howland source, current noise density, current source.

A mis padres y hermanos

Agradecimientos

A mi familia por su apoyo en esta etapa de mi vida.

A mi director de tesis Moisés Castro gracias por sus consejos, apoyo y por su paciencia a lo largo de este trabajo.

A los miembros del comité de tesis M.C. Ricardo Francisco Núñez Pérez, Dr. Enrique Mitrani Abenchuchan, Dr. Héctor Escamilla Taylor, Dr. Horacio Soto Ortiz, gracias por sus consejos y sus valiosas aportaciones realizadas en el desarrollo de esta tesis.

Al Dr. David Covarrubias por sus enseñanzas y su apoyo en mi estancia en el posgrado.

A mis compañeros y amigos de generación Cecy, Kunde, Sata, Mitre, Iván, Jaquelin, Naihvy, Jacobo, Saltillo, Jesús, Juan Carlos, Israel, Miguel y Paulino, por todos los momentos compartidos en estos dos años.

A mis amigos Noemi, Paul y Flor por su apoyo y amistad.

A los integrantes de los equipos de futbol, basquetbol, softbol, voleibol y en especial a los tulicanos por los buenos momentos en los juegos. A René Torres por su ayuda en la fabricación del circuito impreso.

A todos los investigadores, estudiantes y personal del departamento por su enseñanza académica.

A CICESE y a CONACyT y por su apoyo.

Contenido

	Página
Resumen	i
Resumen en inglés	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Contenido	v
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	xi
I. Introducción	1
I.1 Antecedentes	2
I.2 Objetivo general	2
I.3 Objetivos particulares	3
I.4 Estructura de la tesis	3
II. Ruido eléctrico	5
II.1 Introducción	5
II.1.1 Ruido eficaz y ruido de pico a pico	5
II.1.2 Ruido de piso	7
II.1.3 Relación de señal a ruido	7
II.1.4 Múltiples fuentes de ruido	8
II.1.5 Unidades de ruido	8
II.2 Ruido intrínseco	8
II.2.1 Tipos de ruido	9
II.2.2 Ruido de granalla	9
II.2.3 Ruido térmico o ruido de Johnson	12
II.2.4 Ruido de parpadeo o ruido $1/f$ (flicker noise)	14
II.2.5 Ruido impulsivo o ruido de “palomitas”	15
II.2.6 Ruido de avalancha	15
II.3 Ruido extrínseco	16
II.3.1 Introducción	16
II.3.2 Ruido de conducción	18
II.3.3 Ruido de acoplamiento	19

Contenido (continuación)

	Página
II.4 Resumen	22
III. La fuente de Howland	23
III.1 Distintas configuraciones de la fuente de Howland	24
III.1.1 Análisis de las distintas configuraciones de la fuente de Howland	24
III.2 Diseño propuesto	28
III.2.1 Tercera configuración	28
III.3 Sensibilidad	28
III.4 Respuesta transitoria	29
III.5 Resumen	30
IV. Simulaciones y mascarilla del circuito impreso	31
IV.1 Simulaciones realizadas en PSPICE	32
IV.2 Diagrama esquemático y mascarillas del circuito impreso	33
IV.2.1 Diagrama esquemático	33
IV.2.2 Mascarillas del circuito impreso	34
IV.3 Resumen	36
V. Cálculo del ruido en la fuente propuesta	37
V.1 Análisis de ruido	37
V.1.1 Ruido en las resistencias	38
V.1.2 Ruido en el amplificador operacional	39
V.1.3 Ruido 1/f	40
V.1.4 Ruido de granalla	42
V.1.5 Ruido de corriente total del circuito	43
V.1.6 Ruido de corriente total del circuito en dBm	43
V.1.7 Conclusiones parciales	44
V.2 Cálculo de la sensibilidad	45
V.3 Cálculo de la respuesta transitoria	52
V.4 Resumen	53
VI. Resultados	54
VI.1 Resultados experimentales de la medición de ruido	54
VI.1.1 Procedimiento de medición de ruido	55
VI.1.2 Medición de niveles de ruido de la fuente LDC-205	56
VI.1.3 Medición de niveles de ruido de la fuente LDX-3620	57
VI.1.4 Medición de niveles de ruido de la fuente de Howland II	58
VI.2 Resultados experimentales utilizando la fuente con un dispositivo op- toelectrónico	59

Contenido (continuación)

	Página
VI.2.1 Medición de potencia óptica	59
VI.2.2 Medición de potencia con el analizador de espectros óptico	62
VI.3 Resumen	64
VII. Discusión de resultados y conclusiones	65
VII.1 Comparación de los niveles de ruido	66
VII.2 Comparación de la potencia óptica	70
VII.3 Comparación del espectro óptico	71
VII.4 Características y especificaciones de la fuente propuesta	71
VII.4.1 Características de la fuente propuesta	71
VII.4.2 Especificaciones de la fuente propuesta	72
VIII. Conclusiones	74
VIII.1 Aportaciones	74
VIII.2 Trabajo futuro	75
Referencias	76
A. Características y especificaciones de la fuente ILX-lightwave LDX-3620	77
A.1 Características de la fuente LDX-3620	77
A.2 Especificaciones de la fuente LDX-3620	79
B. Programa de Matlab utilizado para calcular la sensibilidad	81

Lista de figuras

Figura		Página
1	Distribución gaussiana de la energía del ruido.	6
2	Generación del ruido de granalla.	10
3	Ruido térmico.	12
4	Ruido de avalancha.	16
5	Espectro de frecuencia de fuentes de ruido.	18
6	Impedancia de tierra común.	20
7	Fuente de Howland, configuración 1.	23
8	Fuente de Howland, configuración 2.	25
9	Fuente de Howland, configuración 3.	26
10	Fuente de Howland II diseño propuesto.	31
11	Para un valor de $v_i = 2v$ la corriente de salida i_L es igual a $500mA$. . .	32
12	Diagrama a cuadros de la alimentación de la fuente de Howland II, diseño propuesto.	33
13	Diagrama a cuadros de la fuente de Howland II, diseño propuesto. . . .	33
14	Mascarilla de la fuente de Howland II del diseño propuesto, vista superior.	34
15	Mascarilla de la fuente de Howland II del diseño propuesto, vista inferior.	34
16	Circuito de prueba de la fuente de Howland II del diseño propuesto, vista lateral izquierda.	35
17	Circuito de prueba de la fuente de Howland II del diseño propuesto, vista superior.	35
18	Circuito de prueba de la fuente de Howland II del diseño propuesto, vista lateral derecha.	36
19	Fuente de Howland II del diseño propuesto.	45
20	Variación de la corriente de salida I_L dada $\Delta R_1 = 10\Omega$ con diferentes valores de v_i	49

Lista de figuras (continuación)

Figura		Página
21	Variación de la corriente de salida I_l dada $\Delta R_2 = 10\Omega$ con diferentes valores de v_i	49
22	Variación de la corriente de salida I_l dada $\Delta R_3 = 10\Omega$ con diferentes valores de v_i	50
23	Variación de la corriente de salida I_l dada $\Delta R_4 = 10\Omega$ con diferentes valores de v_i	50
24	Variación de la corriente de salida I_l dada $\Delta R_x = 0.04\Omega$ con diferentes valores de v_i	51
25	Variación de la corriente de salida I_l cuando $\Delta R_1 = 0\Omega$ con diferentes valores de v_i	52
26	Respuesta transitoria de la fuente de Howland II simulada.	53
27	Diagrama a cuadros para la medición del ruido en las fuentes.	56
28	Medición de ruido de la fuente LDC-205.	56
29	Medición de ruido de la fuente LDX-3620.	57
30	Medición de ruido de la fuente de Howland II.	58
31	Diagrama a cuadros de la medición realizada con el medidor de potencia óptica, que mide la potencia óptica del BOA-1004.	60
32	Medición de la potencia óptica del BOA-1004 alimentado con la fuente LDX-3620.	61
33	Medición de la potencia óptica del BOA-1004 alimentado con la fuente de Howland II.	61
34	Diagrama a cuadros de la medición realizada con el analizador de espectro óptico que mide el espectro del BOA-1004.	62
35	Medición del espectro óptico del BOA-1004 alimentado con la fuente LDX-3620.	63
36	Medición del espectro óptico del BOA-1004 alimentado con la fuente de Howland II.	64
37	Comparación del nivel de ruido medido en las tres fuentes con una corriente de $20mA$	66

Lista de figuras (continuación)

Figura		Página
38	Comparación del nivel de ruido medido en las tres fuentes con una corriente de $100mA$	67
39	Comparación del nivel de ruido medido en las tres fuentes con una corriente de $200mA$	68
40	Comparación del nivel de ruido medido en las tres fuentes con una corriente de $500mA$	69
41	Comparación de la medición de potencia óptica en dBm del BOA-1004 alimentado con la fuente LDX-3620 y con la fuente de Howland II. . . .	70
42	Comparación de la medición de potencia óptica en mW del BOA-1004 alimentado con la fuente LDX-3620 y con la fuente de Howland II. . . .	70
43	Comparación de la medición del espectro óptico del BOA-1004 alimentado con la fuente LDX-3620 y con la fuente de Howland II.	71

Lista de tablas

Tabla		Página
I	Fuentes de ruido externo (parte 1).	21
II	Fuentes de ruido externo (parte 2).	22
III	Ruido de corriente en las resistencias del circuito de la fuente propuesta.	39
IV	Relación entre I_c e I_B	41
V	Ruido de corriente 1/f del circuito de la fuente propuesta.	42
VI	Ruido de corriente de granalla del circuito de la fuente propuesta.	43
VII	Ruido de corriente total del circuito de la fuente propuesta.	44
VIII	Parámetros estadísticos de la medición de ruido de la fuente LDC-205.	57
IX	Parámetros estadísticos de la medición de ruido de la fuente LDX-3620.	58
X	Parámetros estadísticos de la medición de ruido de la fuente de Howland II.	59
XI	Parámetros estadísticos de la medición de ruido en las tres fuentes con una corriente de $20mA$	66
XII	Parámetros estadísticos de la medición de ruido en las tres fuentes con una corriente de $100mA$	67
XIII	Parámetros estadísticos de la medición de ruido en las tres fuentes con una corriente de $200mA$	68
XIV	Parámetros estadísticos de la medición de ruido en las tres fuentes con una corriente de $500mA$	69
XV	Intervalo de corriente de la fuente propuesta.	72
XVI	Ruido de la fuente propuesta.	72
XVII	Densidad de ruido y límite de corriente de la fuente propuesta.	73
XVIII	Especificaciones de la fuente LDX-3620.	79
XIX	Estabilidad de la fuente LDX-3620.	80
XX	Límite de corriente de la fuente LDX-3620.	80

XXI Despliegue de la fuente LDX-3620. 80

Capítulo I

Introducción

Los dispositivos optoelectrónicos trabajan con señales eléctricas y ópticas; son capaces de transformar señales eléctricas en ópticas o viceversa.

En varios laboratorios de optoelectrónica se cuenta con fuentes de corriente para excitar dispositivos semiconductores emisores de luz, generalmente diodos láser.

En la estabilidad del funcionamiento de los dispositivos optoelectrónicos la fuente de corriente juega un papel importante, ya que ésta alimenta el dispositivo; si la fuente es ruidosa, la salida del dispositivo se ve afectada por dicho ruido, el cual provoca inestabilidad en la salida (v.g., esta inestabilidad se puede observar como variaciones no deseadas en la salida). Para obtener una salida más estable se necesita alimentar al dispositivo optoelectrónico con una fuente de bajo ruido, que en la mayoría de los casos resultan costosas. Para poder obtener una fuente de bajo ruido es necesario hacer un análisis de las características y especificaciones de los componentes que la integrarán.

Los ruidos que más afectan en el diseño son los ruidos intrínsecos, los cuales existen internamente en el componente, por lo que no se pueden reducir o eliminar una vez utilizado éste. Por otro lado, cuando el equipo está expuesto a un medio ambiente fuera del laboratorio el ruido que más afecta es el extrínseco, ya que éste no se puede controlar.

I.1 Antecedentes

Este tema de tesis surge de la necesidad que tiene el laboratorio de “Funciones lógicas completamente ópticas para los sistemas fotónicos de telecomunicaciones” de contar con fuentes de corriente de bajo ruido y de bajo costo. Para lograr atender esta necesidad se optó por realizar una fuente de corriente a la que hemos nombrado fuente de Howland II, por estar basada en la fuente de Howland, la cual presenta características importantes para su buen funcionamiento cuando se aplica como fuente de corriente de bajo ruido.

El circuito básico de la fuente de Howland fue inventado por el Prof. Bradford Howland del MIT, en 1962; este invento fue revelado por su colega George A. Philbrick (pionero de la computadora analógica y jefe de Investigaciones Philbrick, Boston MA, en ese momento). El circuito de la fuente de Howland actual fue publicado por primera vez en enero 1964 en “Lightning Empiricist”, Volumen 12, Número 1 (Pease, 2008).

Para la comparación de la fuente de Howland II se tomó como referencia la fuente de laboratorio ILX-Lightwave LDX-3620, la cual tiene un precio aproximado de 3325.00*Dlrs* (Ilxlightwave, 2010); sus características y especificaciones se describen en el apéndice A. En cambio la fuente de Howland II, resulta de bajo costo, ya que se construye con pocos componentes y puede obtenerse un nivel bajo de ruido si se eligen adecuadamente los componentes.

I.2 Objetivo general

El objetivo de este trabajo es analizar la fuente de Howland para su posible utilización en dispositivos optoelectrónicos que requieren alimentación de bajo ruido y diseñar, construir, probar y comparar su desempeño con la fuente comercial que actualmente se utiliza en el laboratorio para éste fin.

I.3 Objetivos particulares

- Diseñar una fuente de corriente con características similares a las de la fuente ILX-Lightwave LDX-3620, existente en el laboratorio de “Funciones lógicas completamente ópticas para los sistemas fotónicos de telecomunicaciones”.

La fuente contempla los siguientes aspectos:

- Bajo ruido, que implica diseño basado en componentes de bajo ruido y en alimentación con batería.
 - Alta estabilidad de corriente salida.
 - Límite de corriente.
 - Dos intervalos de corriente de salida (0-200mA y 0-500mA).
- Comparar sus desempeños cualitativo y cuantitativo con los de la fuente ILX-Lightwave LDX-3620.
 - Probar el equipo en su campo de aplicación, i.e., en el laboratorio de “Funciones lógicas completamente ópticas para los sistemas fotónicos de telecomunicaciones”.

I.4 Estructura de la tesis

En el capítulo II, se describen los conceptos básicos del ruido eléctrico, los tipos de ruido que se presentan en el diseño de la fuente de corriente, tanto los intrínsecos como los extrínsecos.

En el capítulo III, se describe la fuente de Howland, las distintas configuraciones que existen; se presenta el diseño que se utiliza en la realización de la fuente de corriente y también se describe la sensibilidad y la respuesta transitoria.

En el capítulo IV, se presenta el circuito propuesto para la realización de la fuente; se presentan simulaciones, la mascarilla del circuito impreso.

En el capítulo V, se presentan los resultados teóricos del cálculo del ruido, el cálculo de la sensibilidad y la respuesta transitoria de la fuente de Howland II.

En el capítulo VI se muestran las mediciones de los niveles de ruido de las fuentes: ILX-Lightwave LDX-3620, LDC-205 y de la fuente de Howland II, y las comparaciones entre ellas, también se presentan las características y especificaciones de la fuente propuesta.

En el capítulo VII, se exponen las conclusiones y aportaciones de esta tesis, así como también las recomendaciones para el trabajo futuro.

En el apéndice A, se presentan las características y especificaciones de la fuente ILX-Lightwave LDX-3620.

En el apéndice B, se presentan los programas realizados en Matlab para obtener la sensibilidad.

Capítulo II

Ruido eléctrico

En este capítulo se describe qué es el ruido eléctrico y cómo se produce. Se describen los tipos de ruido intrínsecos que existen y que afectan en el diseño de circuitos, se explicará a detalle los ruidos que más afectan.

También se describen los tipos de ruidos extrínsecos más elementales y cómo afectan a los circuitos eléctricos.

II.1 Introducción

El ruido es una señal aleatoria, i.e., ni la magnitud ni la fase de la forma de onda se pueden predecir en ningún momento. El ruido también se genera internamente en un amplificador operacional y, aunque éste está asociado a componentes pasivos, también puede ser inducido externamente (Carter y Mancini, 2009).

II.1.1 Ruido eficaz y ruido de pico a pico

Las amplitudes instantáneas del ruido de tensión o de corriente pueden ser tanto positivas como negativas y cuando se grafican forman un patrón aleatorio centrado en cero. Dado que las fuentes de ruido tienen amplitudes que varían aleatoriamente con el tiempo, sólo se pueden especificar con una función de densidad de probabilidad. La

función de densidad de probabilidad más común es la gaussiana. En una función de probabilidad gaussiana, hay un valor medio de amplitud, el cual es el más probablemente que ocurra. La probabilidad de que la amplitud de ruido sea más alta o más baja que el valor medio cae en la curva con forma de campana, que es simétrica alrededor del centro (c.f., en la figura 1) (Carter y Mancini, 2009).

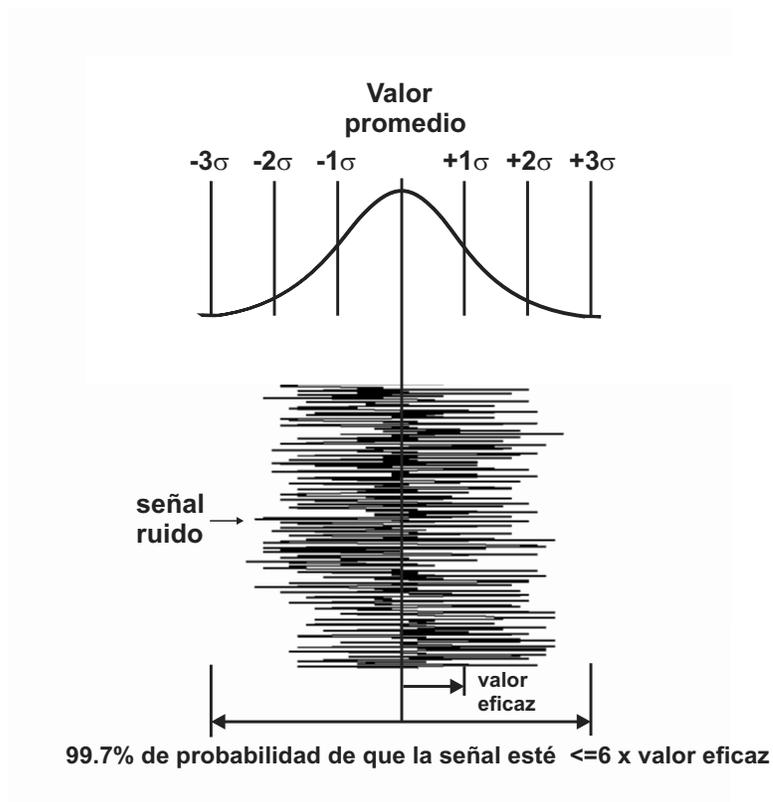


Figura 1. Distribución gaussiana de la energía del ruido.

σ es la desviación estándar de la distribución gaussiana y también es el valor eficaz del ruido de tensión y de corriente. La amplitud instantánea del ruido está 68% del tiempo dentro de $\pm 1\sigma$. Teóricamente la amplitud instantánea del ruido puede tener valores prácticamente infinitos. Sin embargo la probabilidad decae rápidamente cuando la amplitud aumenta. La amplitud instantánea del ruido está 99.7% del tiempo dentro

de $\pm 3\sigma$ del valor medio. Si se desea una garantía más o menos adecuada de que ocurra, esto es entre 95.4% dentro de $\pm 2\sigma$ y 99.94% dentro de $\pm 3.4\sigma$ del tiempo.

σ^2 es el promedio de la variación del valor medio al cuadrado sobre el valor promedio. Esto también significa que el promedio de la variación del valor medio al cuadrado, i^2 o e^2 , es la misma que la varianza σ^2 .

El ruido térmico y el de granalla tienen una función de densidad de probabilidad gaussiana (Baker, 2005).

II.1.2 Ruido de piso

Este nivel de ruido determina la señal más pequeña para la cual el circuito es útil. El objetivo para el diseñador es colocar las señales que el circuito va a procesar sobre el ruido de piso, pero debajo del nivel de saturación del transistor donde la señal se recortará.

II.1.3 Relación de señal a ruido

Lo ruidoso de la señal se mide por la relación

$$\frac{S_{(f)}}{N_{(f)}} = \frac{TES}{TER}, \quad (1)$$

donde

TES=Tensión eficaz de la señal,

TER=Tensión eficaz del ruido.

II.1.4 Múltiples fuentes de ruido

Cuando hay múltiples fuentes de ruido, el ruido eficaz total de la señal es la raíz cuadrada de la suma del valor eficaz al cuadrado de cada una de las fuentes de ruido individual.

$$\sqrt{e_{1eficaz}^2 + e_{2eficaz}^2 + \dots e_{neficaz}^2}. \quad (2)$$

Dicho de otra manera, éste es el único valor importante que el diseñador tiene cuando trata con el ruido. Si hay dos fuentes de ruido de amplitudes iguales en el circuito, el ruido total no se estaría multiplicando por 2 sino por $\sqrt{2}$ (i.e., no aumenta 6dB, sólo aumenta 3dB) (Carter y Mancini, 2009).

II.1.5 Unidades de ruido

El ruido normalmente se especifica por su densidad espectral en valor eficaz entre raíz cuadrada de Hz , V/\sqrt{Hz} o A/\sqrt{Hz} , ya sea de tensión o de corriente . Para usar estas unidades es necesario un intervalo de frecuencia para relacionarlas con los niveles de ruido observados.

II.2 Ruido intrínseco

En esta sección se explicarán algunos tipos de ruidos intrínsecos, así como la forma en que se calculan. Estos ruidos se presentan internamente en los componentes electrónicos, por lo tanto no se pueden eliminar.

II.2.1 Tipos de ruido

Existen cinco tipos de ruido asociados a los amplificadores operacionales y a los componentes pasivos de un circuito:

- 1) Ruido de granalla (en inglés: shot noise).
- 2) Ruido térmico o de Johnson.
- 3) Ruido 1/f (en inglés: flicker noise).
- 4) Ruido impulsivo o de “palomitas”.
- 5) Ruido de avalancha.

Algunos o todos estos ruidos pueden estar presentes en el diseño de circuitos, dando un espectro de ruido único al sistema. En la mayoría de los casos no es posible separarlos, pero conocer lo que los genera ayuda al diseñador a optimizar el diseño, minimizándolo en la banda de interés. El diseño apropiado para un circuito de bajo ruido involucra un balance entre estas fuentes de ruido y las de ruido externo.

II.2.2 Ruido de granalla

Algunas veces es referido como ruido cuántico. Es causado por fluctuaciones aleatorias en el movimiento de los portadores en un conductor.

Dicho de otra manera, el flujo de la corriente no es un movimiento continuo. El flujo de corriente corresponde a electrones que se mueven de acuerdo con el potencial aplicado. Cuando los electrones encuentran una barrera que les impide el paso, almacenan energía potencial hasta que adquieren la suficiente para cruzarla. Cuando tienen la suficiente energía potencial, ésta es abruptamente transformada en energía cinética al cruzar la barrera. Como analogía se puede mencionar el estrés de una falla sísmica que es liberado repentinamente como un terremoto.

Cada electrón cruza aleatoriamente la barrera de potencial, como en una unión np de un semiconductor; cada electrón contribuye con un pequeño “pop”, de la energía almacenada que se libera en el momento del cruce de la barrera (como se muestra en la figura 2).

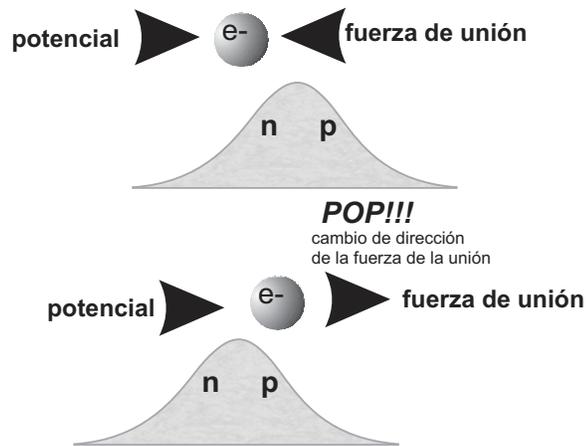


Figura 2. Generación del ruido de granalla.

La suma del efecto del cruce de todos los electrones a través de la barrera es el ruido de granalla. El ruido de granalla amplificado ha sido descrito como un sonido similar al producido por los perdigones de plomo que golpean una pared de concreto (Carter y Mancini, 2009).

Algunas características del ruido de granalla son que:

- Siempre está asociado con el flujo de la corriente; desaparece al desaparecer la corriente.
- Es independiente de la temperatura.
- Tiene un espectro plano; i.e., su densidad de potencia es uniforme.
- Está presente en todos los conductores, no sólo en los semiconductores. Simples

imperfecciones o impurezas en el metal pueden constituir barreras en los conductores. El nivel de ruido de granalla, normalmente es muy pequeño debido al enorme número de electrones que se mueven en el conductor, y al tamaño relativo de las barreras. Este ruido es más grande en los semiconductores que en los conductores.

El valor eficaz de la corriente de ruido de granalla en semiconductores es

$$I_g = \sqrt{(2qI_{dc} + 4qI_0) B}, \quad (3)$$

en donde

q = Carga del electrón (coulombs),

I_{dc} = Promedio de corriente en c.d. (amperios),

I_0 = Corriente inversa de saturación (amperios),

B = Anchura de banda (Herz).

Si la unión pn está polarizada, I_0 es cero y el segundo término desaparece. Si se usa la ley de Ohm y la resistencia dinámica de la unión:

$$r_d = \frac{kT}{qI_{dc}}, \quad (4)$$

entonces la tensión eficaz del ruido de granalla es igual a

$$E_g = kT \sqrt{\frac{2B}{qI_{dc}}}, \quad (5)$$

donde

k = Constante de Boltzmann (Joules/K),

q = Carga del electrón (coulombs),

T = Temperatura absoluta (Kelvin),

I_{dc} = Promedio de corriente c.d. (amperios),

B = Anchura de banda (Hertz).

II.2.3 Ruido térmico o ruido de Johnson

Al ruido térmico también se le conoce como ruido de Johnson, quien lo descubrió. Este ruido se genera por la agitación térmica de los electrones en el conductor. En pocas palabras, si un conductor se calienta se vuelve más ruidoso. El calentamiento altera la respuesta de los electrones cuando se les aplica un potencial. El calentamiento agrega un movimiento aleatorio a su desplazamiento común (figura 3). El ruido térmico sólo desaparece en la temperatura de cero absoluto.

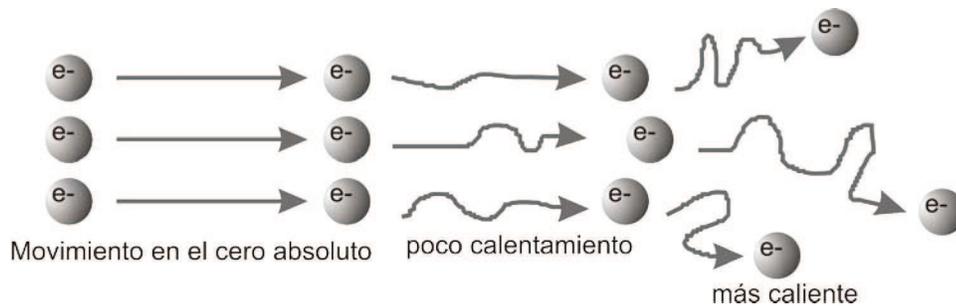


Figura 3. Ruido térmico.

Así como el ruido de granalla, el ruido térmico tiene un espectro plano y una densidad de potencia uniforme (i.e., parecido al ruido blanco), pero es independiente del

flujo de corriente. En frecuencias por debajo de los $100MHz$, el ruido térmico puede ser calculado usando la relación de Nyquist:

$$E_{term} = \sqrt{4kTRB}, \quad (6)$$

o

$$I_{term} = \sqrt{\frac{4kTB}{R}}, \quad (7)$$

donde

E_{term} = Tensión eficaz del ruido térmico (volts),

I_{term} = Corriente eficaz del ruido térmico (amperios),

k = Constante de Boltzmann (Joules/K),

T = Temperatura absoluta (Kelvin),

R = Resistencia (ohms),

B = Anchura de banda (Hertz).

El ruido en un resistor es proporcional a su resistencia y a su temperatura. Es importante no utilizar resistencias en temperaturas elevadas cuando se encuentre en un lazo de alta ganancia en la etapa de entrada en un amplificador. Las resistencias de valores bajos también reducen el ruido térmico, cuando de tensión de ruido se trata (Carter y Mancini, 2009).

II.2.4 Ruido de parpadeo o ruido $1/f$ (flicker noise)

Al ruido de parpadeo también se le conoce como ruido $1/f$. Está presente en todos los dispositivos activos y en muchos dispositivos pasivos, y se genera principalmente por las imperfecciones de la estructura cristalina de los semiconductores. Un mejor proceso de fabricación puede reducirlo.

Algunas características del ruido $1/f$ son que:

- Crece cuando la frecuencia disminuye, por eso se llama $1/f$.
- Está asociado con la corriente directa en dispositivos electrónicos.
- Tiene la misma potencia contenida en cada octava (o década).

$$E_{rp} = k_v \sqrt{\ln \frac{f_{\max}}{f_{\min}}}; I_{rp} = k_i \sqrt{\ln \frac{f_{\max}}{f_{\min}}}, \quad (8)$$

donde

k_v y k_i son constantes proporcionales (voltios o amperios) que representan E_{rp} e

I_{rp} en la frecuencia de $1Hz$,

f_{max} y f_{min} son la máxima y la mínima frecuencia (Hertz).

El ruido $1/f$ se encuentra en las resistencias de carbón, también se le conoce como ruido de exceso porque aparece sumado al ruido térmico. Otro tipo de resistencias presentan el ruido $1/f$ en distintos grados, i.e., las resistencias de alambre presentan menor ruido $1/f$. Como es proporcional a la corriente directa en el dispositivo, si la corriente se mantiene en un nivel suficientemente bajo, el ruido térmico predominará y el tipo de resistencia utilizada no cambiará el ruido en el circuito.

Para reducir el consumo de potencia en un circuito con amplificadores operacionales se aumenta la resistencia, lo cual también puede reducir el ruido $1/f$, pero aumentará el ruido térmico y el de acoplamiento de ruido externo (Castro Delgado y Nuñez Perez, 2008).

II.2.5 Ruido impulsivo o ruido de “palomitas”

Este ruido está relacionado con imperfecciones en el semiconductor y con la implantación de iones pesados. Está caracterizado por pulsos discretos de alta frecuencia. Los pulsos pueden variar, pero las amplitudes permanecen constantes varias veces en niveles del ruido térmico. El ruido impulsivo produce un sonido de “pop” a frecuencias por debajo de los $100MHz$; cuando se escucha a través de una bocina este sonido de “pop” es semejante al que hacen las palomitas de maíz. Este ruido está bajo control del diseñador del circuito integrado o del transistor.

II.2.6 Ruido de avalancha

El ruido de avalancha se produce cuando una unión pn se opera en polarización inversa. Bajo la influencia del campo eléctrico inverso y de la región vacía de la unión, los electrones tienen suficiente energía cinética, que al chocar con los átomos de la estructura del cristal generan pares electrón-hueco (figura 4). Estas colisiones son aleatorias y producen pulsos de corriente similares a los del ruido de granalla, pero mucho más intensos.

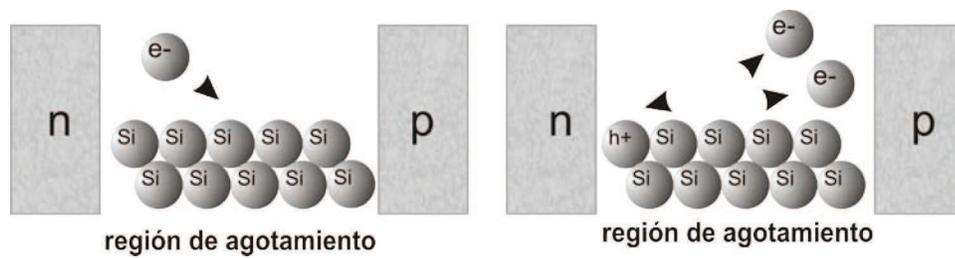


Figura 4. Ruido de avalancha.

Cuando los electrones y los huecos en la región vacía de la polarización inversa adquieren suficiente energía que causan el efecto de avalancha, son generados ruidos aleatorios. La magnitud del ruido es difícil de predecir debido a su dependencia del material.

El diodo zéner, por su principio de operación, produce ruido de avalancha; éste es un problema cuando se diseñan circuitos con amplificadores operacionales y diodos zener. La mejor forma de eliminar el ruido de avalancha es rediseñar el circuito y no utilizar diodos zéner (Carter y Mancini, 2009).

II.3 Ruido extrínseco

En esta sección se describen algunos de los ruidos extrínsecos. Se presenta una breve introducción de los tipos de ruido más comunes se describen algunos métodos con los cuales se pueden controlar éstos.

II.3.1 Introducción

El amplio uso de circuitos electrónicos para la comunicación, computación, automatización y otros fines hace necesario que diversos circuitos operen cerca uno de otro. Frecuentemente estos circuitos se afectan entre sí negativamente.

La interferencia electromagnética (IEM) se ha convertido en un grave problema para los diseñadores de circuitos, y es probable que sea más severa en el futuro. El gran número de dispositivos electrónicos de uso común es en parte responsable de esta tendencia. Además el uso de circuitos integrados y la integración a gran escala ha reducido el tamaño de los equipos electrónicos. Como los circuitos se han vuelto más pequeños y complejos, más circuitos están siendo fabricados en menor espacio, lo que aumenta la probabilidad de interferencia (Ott, 1988).

Los diseñadores de hoy tienen que hacer más que simplemente hacer que sus sistemas operen en condiciones ideales en el laboratorio. Además de esa tarea, también deben asegurarse de que el equipo funcione en el “mundo real”, con otros equipos cercanos, lo que significa que el equipo no debe verse afectado por las fuentes de ruido externo, y no debería ser una fuente de ruido hacia el medio ambiente. La compatibilidad electromagnética (C.E.M.) debe ser un objetivo importante del diseño (Ott, 1988).

Los ruidos extrínsecos se asocian con señales conducidas o radiadas. Por lo general este tipo de ruido no es aleatorio, y no se correlaciona con las señales de interés.

Las interferencias por conducción se asocian más con problemas de alimentación. Dos de las principales dificultades son el rizo en la alimentación y el mal aterrizaje del circuito.

Las interferencias radiadas se asocian con blindaje inadecuado, ya sea magnético, electrostático o electromagnético. La presencia de fuertes campos magnéticos, eléctricos o electromagnéticos en las inmediaciones del circuito también provoca ruido en el sistema. La figura 5 muestra el origen y frecuencia de algunas fuentes de ruido e interferencias que afectan negativamente a los circuitos integrados (Pascoe, 1997).

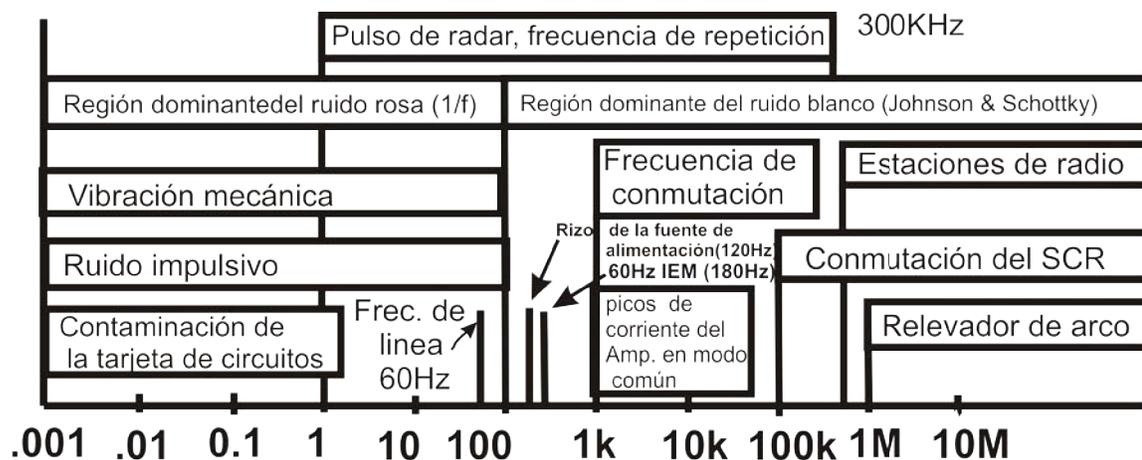


Figura 5. Espectro de frecuencia de fuentes de ruido.

A continuación se describe brevemente el ruido de conducción y el de acoplamiento.

II.3.2 Ruido de conducción

El tipo de ruido que afecta el rendimiento de los dispositivos analógicos es el ruido de conducción. Este tipo de ruido ya existe en los conductores del circuito, tales como las líneas de alimentación o la ruta de señal.

La mejor arma contra el ruido de conducción es analizar la fuente que lo produce y aplicar estrategias de reducción de ruido en el dispositivo o en la fuente de radiación. En algunas ocasiones al conocer el origen del ruido se puede encontrar con que los niveles de ruido no se pueden reducir más, ya que éste corresponde al ruido del dispositivo, el cual ya se analizó como ruido intrínseco.

El origen del ruido de conducción es el ruido del dispositivo o intrínseco y el ruido de acoplamiento.

II.3.3 Ruido de acoplamiento

A continuación se describen tres formas en las que se presenta el ruido de acoplamiento. Primero se describe brevemente el ruido de acoplamiento conductivo, después se describe el ruido de acoplamiento a través de una impedancia de tierra común; por último, se describe el ruido de acoplamiento producido por el campo eléctrico y por el magnético.

II.3.3.1 Ruido de acoplamiento conductivo

Una de las formas más obvias en que el ruido se acopla en un circuito es por medio de un conductor. Un hilo conductor en un ambiente ruidoso puede captar ruido y luego conducirlo a otro circuito, lo cual causa interferencias. La solución es evitar que el cable capte el ruido, o eliminar éste, desacoplándolo antes de que interfiera con el circuito susceptible (Ott, 1988).

Un ejemplo de esta categoría es el ruido de la fuente de alimentación conducido al circuito. Si el diseñador del circuito no tiene control sobre la fuente de alimentación, o si conectara otro equipo a la fuente de alimentación, sería necesario desacoplar el ruido de los cables antes de que entren al circuito.

II.3.3.2 Ruido de acoplamiento a través de una impedancia de tierra común

El ruido de acoplamiento a través de una impedancia de tierra común se produce cuando fluyen las corrientes de dos circuitos diferentes a través de una impedancia en común. La caída de tensión en la impedancia vista por cada circuito se ve influida por la otra. El ejemplo clásico de este tipo de acoplamiento se muestra en la figura 6. Las corrientes de tierra 1 y 2 fluyen a través de la impedancia de tierra común. Por lo que al circuito 1 se refiere, su potencial de tierra es alterado por la tierra de la corriente 2 que fluye a

la impedancia de tierra común. Por lo tanto, algunas señales de ruido se acoplan del circuito de 2 al circuito 1 a través de impedancia a tierra común (Ott, 1988).

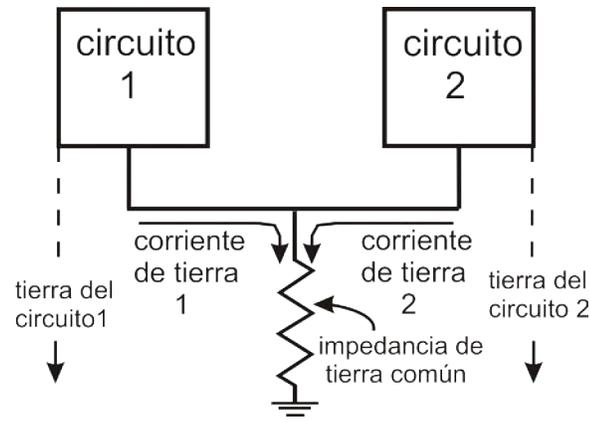


Figura 6. Impedancia de tierra común.

II.3.3.3 Ruido de acoplamiento producido por el campo eléctrico y por el campo magnético

La radiación del campo eléctrico y del magnético son medio de ruido de acoplamiento. Algunos de los elementos del circuito, incluso los conductores, radían campos electromagnéticos. Además de esta radiación no intencional, existe el problema de la radiación intencional de fuentes tales como estaciones de radiodifusión y de los transmisores de radar. Cuando el receptor se coloca cerca de la fuente (campo cercano), el campo eléctrico y el campo magnético se consideran por separado. Cuando el receptor se coloca lejos de la fuente (campo lejano), la radiación se considera como la combinación del campo eléctrico y el campo magnético, i.e., de campo electromagnético (Ott, 1988). Las tablas I y II que se presentan a continuación, describen algunas fuentes de ruido y métodos con los cuales se pueden minimizar sus efectos (Soderquist, 2010).

Tabla I. Fuentes de ruido externo (parte 1).

Fuente	Naturaleza	Causa	Método de minimización
60Hz.	Interferencia repetitiva.	Líneas de alimentación cerca de las entradas del amplificador operacional. Pobre relación señal a ruido a 60Hz. Acoplamiento capacitivo en los transformadores.	Reorientación de las líneas de alimentación. Blindaje de los transformadores. Un solo punto de aterrizaje. Alimentación con batería.
Rizo de 120Hz.	Repetitivo.	Rectificador de rizo de onda completa en las terminales de la alimentación del amplificador operacional.	Diseño completo para minimizar el rizo. Circuito RC para desacoplar el amplificador operacional. Alimentación con batería.
180Hz.	IEM repetitiva.	180Hz radiados de la saturación de 60Hz de los transformadores.	Reorientación física de los componentes. Blindaje. Alimentación con batería.
Estaciones de radio.	Emisión estándar AM a FM.	Acción de la antena en cualquier lugar del sistema.	Blindaje. Filtrar la salida. Circuito limitador de la anchura de banda.
Relevadores e interruptores de arco.	Pulsos de alta frecuencia respecto a la tasa de conmutación.	Cerca de las entradas de los amplificadores, líneas de alimentación, terminales de compensación o anulación de terminales.	Filtrado de componentes de alta frecuencia. Blindaje. Evitar lazos de tierra. Supresores de arco en la fuente de conmutación.

Tabla II. Fuentes de ruido externo (parte 2).

Fuente	Naturaleza	Causa	Método de minimización
Contaminación del circuito impreso.	Baja frecuencia aleatoria.	Uniones o conectores sucios.	Limpieza a fondo en el momento de soldar seguido de un horneado y sellador de humedad.
Transmisores de radar.	Alta frecuencia cerrada a la frecuencia de repetición del pulso de radar.	Transmisores de radar de búsqueda de amplia superficie para la navegación de corto alcance, especialmente cerca de los aeropuertos.	Blindaje.
Vibraciones mecánicas.	Aleatorio $< 100Hz$.	Conexiones flojas, contacto intermitente en equipo móvil.	Atención en los conectores y en la condición de los cables. Sistema de amortiguamiento en varios ambientes.

II.4 Resumen

En este capítulo se abordaron los conceptos básicos del ruido eléctrico necesarios para familiarizarse con los diferentes tipos de ruido que se presentan en un circuito electrónico; también se describieron las principales fuentes de ruido intrínseco y extrínseco. En el siguiente capítulo se presenta lo referente a la fuente de Howland, tema fundamental para la elaboración de este trabajo de tesis.

Capítulo III

La fuente de Howland

La fuente de Howland es una fuente de corriente controlada por tensión. La ecuación característica de la fuente de Howland, como se verá luego, tiene una relación similar a la ley de Ohm (ecuación 9). La configuración básica de la fuente de Howland se muestra en la figura 7.

$$I = \frac{V}{R}, \quad (9)$$

que idealmente es independiente de la carga R_L (c.f. con la figura 7).

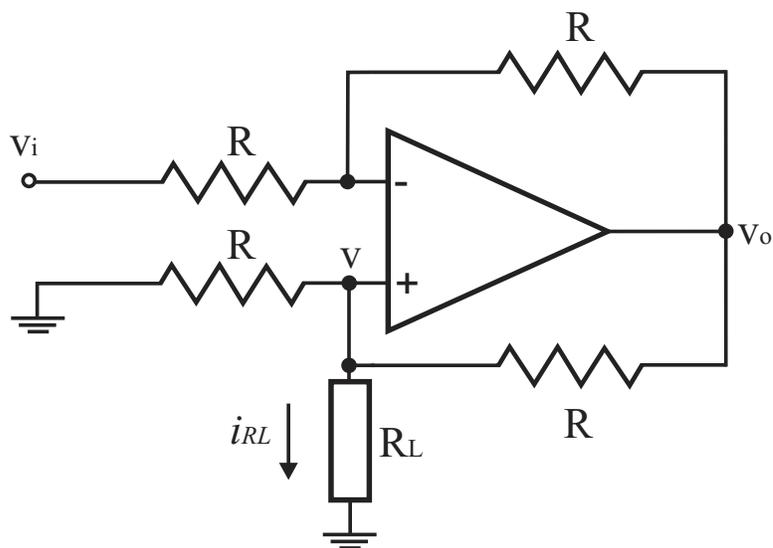


Figura 7. Fuente de Howland, configuración 1.

III.1 Distintas configuraciones de la fuente de Howland

En este capítulo se da una breve descripción del funcionamiento de algunas configuraciones existentes de la fuente de Howland, las cuales teóricamente tienen un comportamiento lineal. También se presenta el análisis de las configuraciones que se mencionan, comprobando que la relación entrada-salida llega a la relación antes mencionada. Las configuraciones que se describen se muestran en la figuras 7, 8 y 9.

III.1.1 Análisis de las distintas configuraciones de la fuente de Howland

III.1.1.1 Análisis de la primera configuración

La primera configuración que se analiza es la de la figura 7. A continuación se muestra el análisis del nodo $v(-)$ y de $v(+)$.

Del nodo $v(-)$:

$$\frac{v - v_i}{R} + \frac{v - v_o}{R} = 0, \quad (10)$$

despejando v se obtiene:

$$v = \frac{v_o + v_i}{2}, \quad (11)$$

del nodo $v(+)$:

$$\frac{v}{R} + i_{RL} + \frac{v - v_o}{R} = 0, \quad (12)$$

sustituyendo v en la ecuación (12) y despejando i_{RL} se obtiene:

$$i_{RL} = -\frac{v_i}{R}. \quad (13)$$

Como se puede observar, en la ecuación (13) la corriente i_{RL} tiene signo negativo, lo que indica que la corriente tiene sentido opuesto al indicado en la figura 7.

El análisis del circuito indica que si la entrada v_i se lleva a la resistencia conectada a la terminal no inversora del amplificador operacional y se aterriza la resistencia conectada a la terminal inversora la corriente de salida i_{RL} cambia el sentido.

III.1.1.2 Análisis de la segunda configuración

Ahora se presentará el análisis de la configuración mostrada en la figura 8, mostrando el análisis de los nodos $v(-)$, $v(+)$, v_c y de v_o .

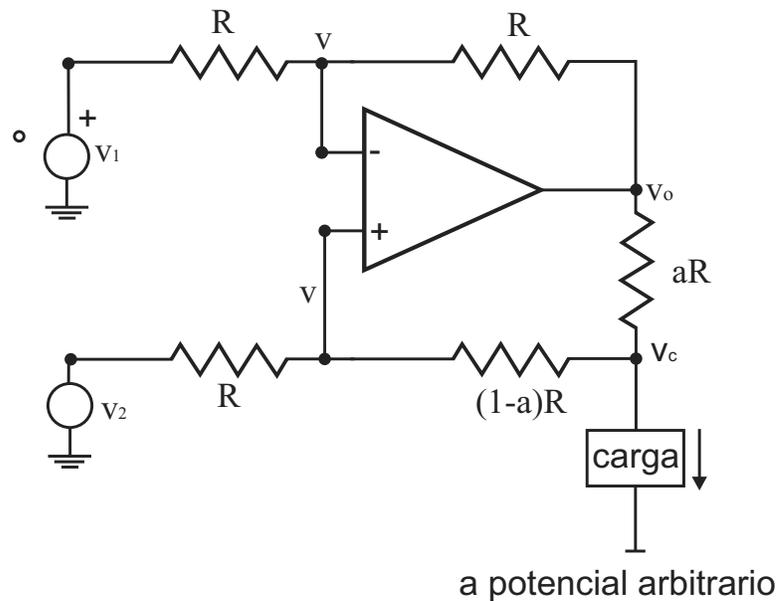


Figura 8. Fuente de Howland, configuración 2.

Del nodo $v(-)$:

$$\frac{v - v_1}{R} + \frac{v - v_o}{R} = 0, \quad (14)$$

del nodo $v(+)$:

$$\frac{v - v_2}{R} + \frac{v - v_c}{(1 - a)R} = 0, \quad (15)$$

del nodo v_c :

$$\frac{v_c - v}{(1 - a)R} + i_c + \frac{v_c - v_o}{aR} = 0, \quad (16)$$

del nodo v_o :

$$\frac{v_o - v_c}{aR} + \frac{v_o - v}{R} = 0. \quad (17)$$

Realizando una serie de despejes y sustituciones se llega a la siguiente ecuación:

$$i_c = \frac{v_2 - v_1}{aR}. \quad (18)$$

Si se compara la ecuación (13) con la (18) se puede observar que si v_2 de la ecuación (18) se iguala a cero y si $a = 1$ se llega a la ecuación (13). Con esto se comprueba que las dos configuraciones tienen la misma expresión para la corriente de salida aunque las configuraciones sean diferentes.

III.1.1.3 Análisis de la tercera configuración

Ahora se presenta el análisis de la configuración mostrada en la figura 9.

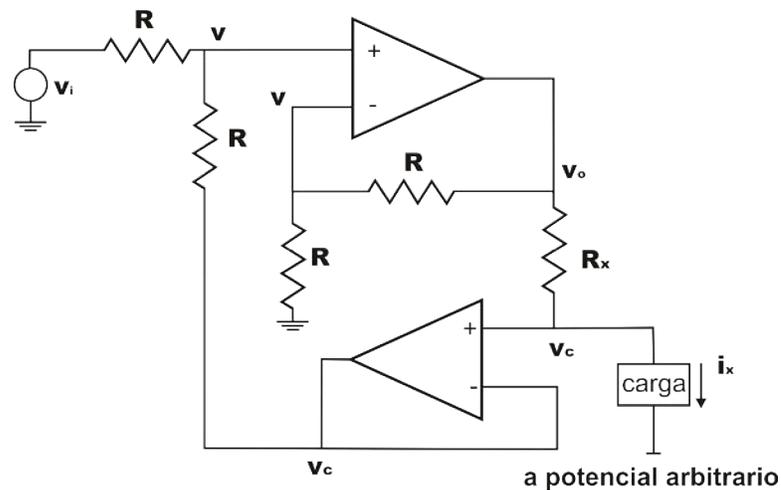


Figura 9. Fuente de Howland, configuración 3.

Las ecuaciones que se obtienen son las siguientes:

Del nodo $v(-)$:

$$\frac{v - v_i}{R} + \frac{v - v_c}{R} = 0, \quad (19)$$

despejando v_c se obtiene:

$$2v - v_i = v_c, \quad (20)$$

del nodo $v(+)$:

$$\frac{v}{R} + \frac{v - v_o}{R} = 0, \quad (21)$$

despejando v_o se obtiene:

$$2v = v_o. \quad (22)$$

Ahora, tomando la corriente que pasa por la resistencia R_x se obtiene:

$$\frac{v_o - v_c}{R_x} = i_x, \quad (23)$$

sustituyendo v_o y v_c en la ecuación anterior se obtiene:

$$\frac{v_i}{R_x} = i_x. \quad (24)$$

De las tres configuraciones de la fuente de Howland presentadas se eligió la de la figura 9, ya que por su diseño presenta una relación lineal de la corriente de salida con respecto a la tensión de entrada (i.e., respeta la ley de Ohm). Esta elección se toma de los resultados experimentales, ya que las otras configuraciones no cumplen a cabalidad experimentalmente la relación de linealidad.

III.2 Diseño propuesto

A continuación se presenta la fuente de Howland que se eligió de las configuraciones presentadas en la sección III.1.1.

III.2.1 Tercera configuración

Esta configuración presenta algunas ventajas sobre las anteriores, una de éstas es el aislamiento del circuito de entrada con respecto a la salida y la posibilidad, mediante la inserción de un transistor en la salida del amplificador principal, de manejar corrientes grandes.

III.3 Sensibilidad

La sensibilidad es una medida de cambio porcentual en alguna característica de comportamiento de una red como resultado de un cambio porcentual de uno o más de los elementos de la red.

Es la variación porcentual de la función que representa un circuito respecto a la variación porcentual de algún componente.

La sensibilidad se calcula con la siguiente ecuación:

$$S_x^y = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left\{ \frac{\frac{\Delta y}{y}}{\frac{\Delta x}{x}} \right\} = \frac{x}{y} \frac{dy}{dx}, \quad (25)$$

donde S es la sensibilidad, x es el componente que varía, y y es la función que representa al circuito.

Conocida la sensibilidad, sería posible conocer de la ecuación (25) la variación de la función, Δy (c.f., con la ecuación 26), propuesta una variación del parámetro, Δx , pues x y y son valores nominales conocidos.

$$\Delta y = \frac{y}{x} \Delta x S_x^y. \quad (26)$$

III.4 Respuesta transitoria

En esta sección se presentan algunos conceptos que se utilizarán más adelante en el cálculo de la respuesta transitoria.

Las características de la respuesta transitoria que se tomaron en cuenta en el análisis de la fuente de Howland II, para una entrada escalón unitario, son las siguientes (Ogata, 1998):

1. Tiempo de retardo, t_d : es el requerido para que la respuesta alcance la primera vez la mitad del valor final.

- 2 . Tiempo de levantamiento, t_r : es el requerido para que la respuesta pase del 10 al 90%, del 5 al 95% o del 0 al 100% de su valor final. Para sistemas subamortiguados de segundo orden, por lo común se usa el tiempo de levantamiento de 0 a 100%. Para sistemas sobreamortiguados, suele usarse el tiempo de levantamiento de 10 a 90%.

3. Tiempo de asentamiento, t_s : es el que se requiere para que la curva de respuesta alcance un intervalo alrededor del valor final del tamaño especificado por el porcentaje absoluto del valor final (i.e., de 2 a 5%) y permanezca dentro de éste. El tiempo de asentamiento se relaciona con la mayor constante de tiempo del sistema de control. Los objetivos del diseño del sistema en cuestión determinan el criterio de error en porcentaje que deberá utilizarse.

III.5 Resumen

En este capítulo se presentó el principio de funcionamiento de la fuente de Howland. Se mostraron los diferentes configuraciones y el análisis de cada una de éstas. Se presentó la configuración propuesta para la realización de la fuente de corriente basada en la fuente mencionada. También se presentaron fundamentos teóricos de la sensibilidad y de la respuesta transitoria, las cuales se utilizaran más adelante. En el siguiente capítulo se reporta el diseño y construcción del circuito al cual se realizaron las pruebas que se presentan en el capítulo VI.

Capítulo IV

Simulaciones y mascarilla del circuito impreso

En este capítulo se presentan algunas simulaciones realizadas con el programa PSPICE y también se presenta el diseño del circuito impreso realizado con el programa ALTIUM Designer. Para la realización de las simulaciones se tomó la configuración del circuito propuesto (v.g., el de la figura 10). Basado en los resultados de las simulaciones y de las pruebas experimentales en el laboratorio se llegó a un circuito que cumple con las especificaciones planteadas en el objetivo de este trabajo.

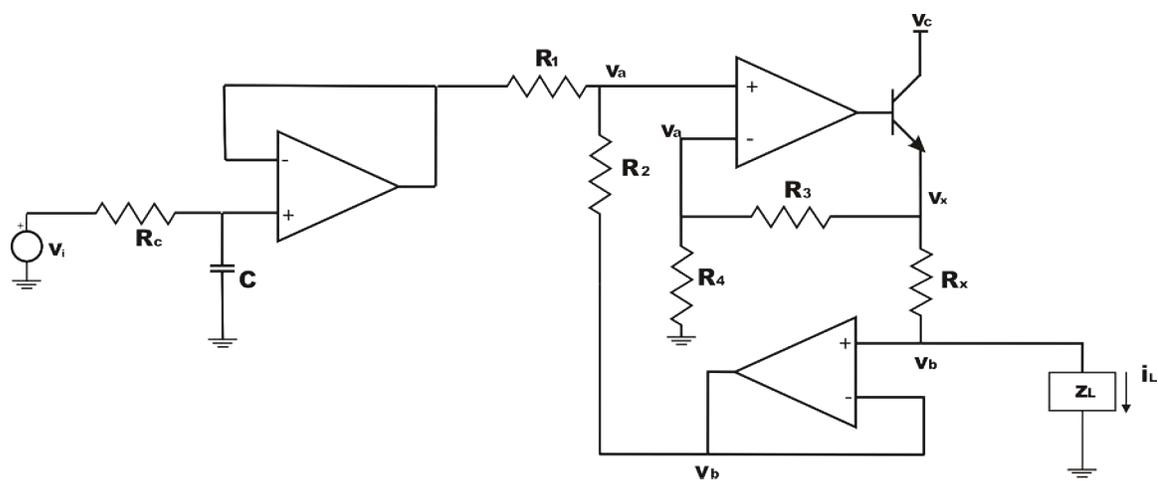


Figura 10. Fuente de Howland II diseño propuesto.

IV.1 Simulaciones realizadas en PSPICE

En esta sección se presentan algunas simulaciones realizadas con el programa PSPICE, en las que se observa el comportamiento del circuito y la respuesta que genera al aplicar una tensión en la entrada del circuito.

La gráfica de la figura 11 muestra los resultados de la simulación realizada para un escalón en la tensión de entrada de $v_i = 2v$, siendo la corriente de salida igual a $500mA$.

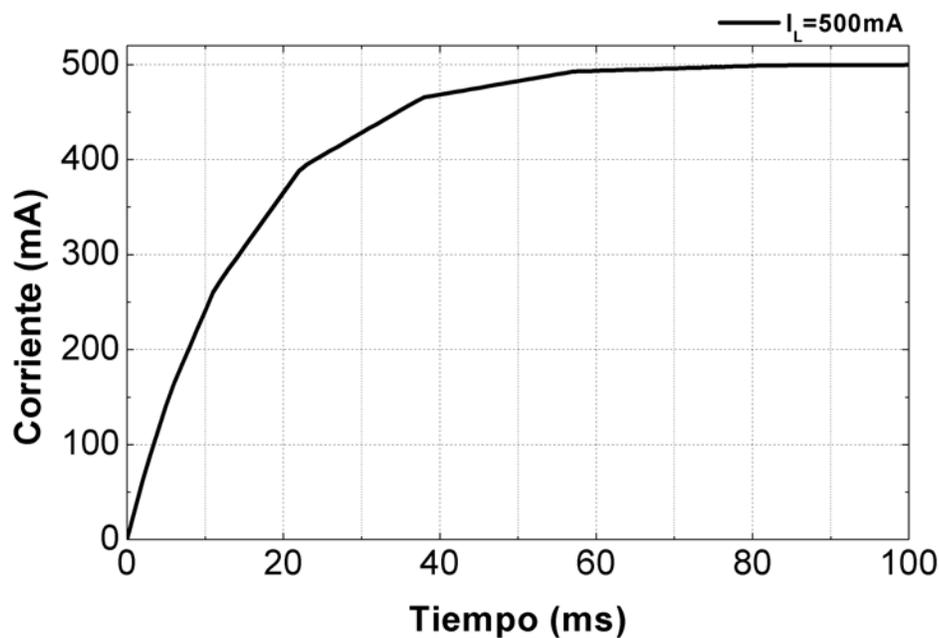


Figura 11. Para un valor de $v_i = 2v$ la corriente de salida i_L es igual a $500mA$.

En las simulaciones realizadas con las corrientes de salida de: $20mA$, $100mA$, $200mA$ y $500mA$, se observó un comportamiento similar. Este comportamiento se debe a que el diseño tiene un circuito suavizador (c.f., con la figura 13), que garantiza que, si se aplica un escalón en la entrada (i.e., de $v_i = 2v$), el comportamiento de la corriente de salida crece suavemente (c.f., con la figura 11), y así se evita dañar el diodo semiconductor de carga.

IV.2 Diagrama esquemático y mascarillas del circuito impreso

En esta sección se presenta el diagrama esquemático del diseño propuesto; también se muestra la mascarilla que se realizó para armar el circuito con el cual se realizaron las pruebas que se presentan en el próximo capítulo.

IV.2.1 Diagrama esquemático

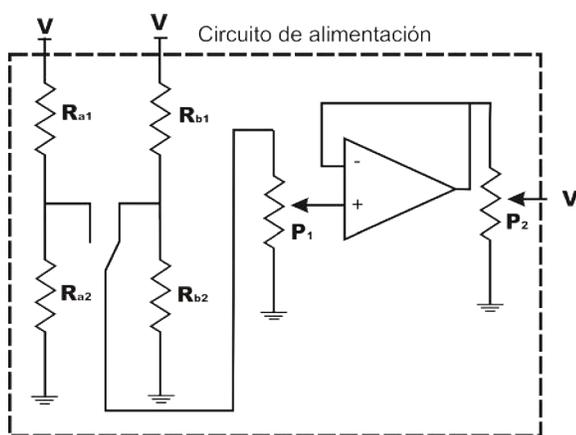


Figura 12. Diagrama a cuadros de la alimentación de la fuente de Howland II, diseño propuesto.

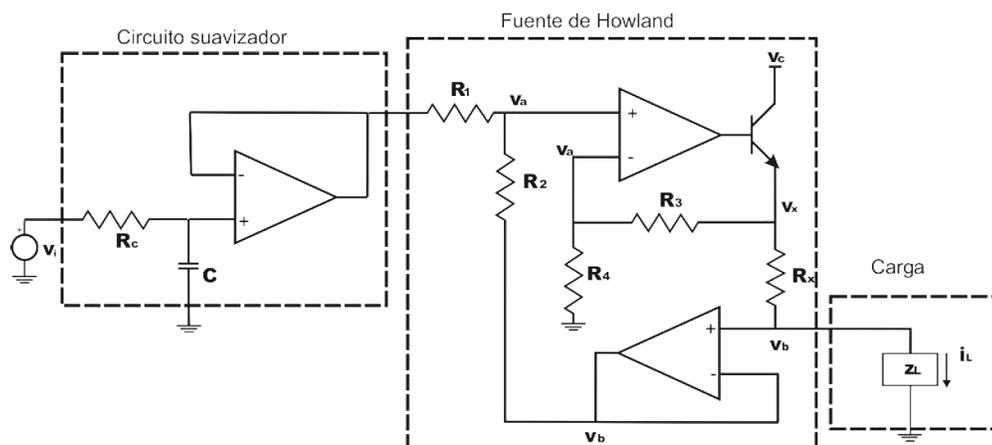


Figura 13. Diagrama a cuadros de la fuente de Howland II, diseño propuesto.

IV.2.2 Mascarillas del circuito impreso

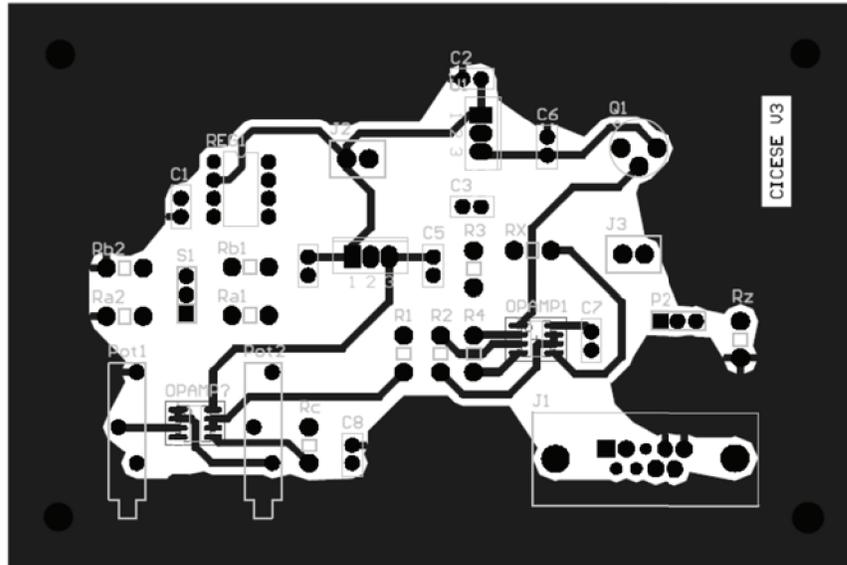


Figura 14. Mascarilla de la fuente de Howland II del diseño propuesto, vista superior.

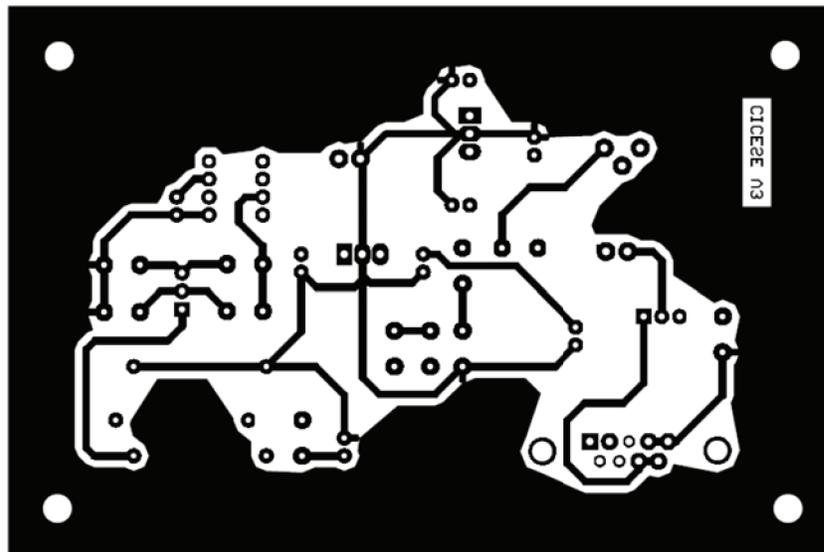


Figura 15. Mascarilla de la fuente de Howland II del diseño propuesto, vista inferior.

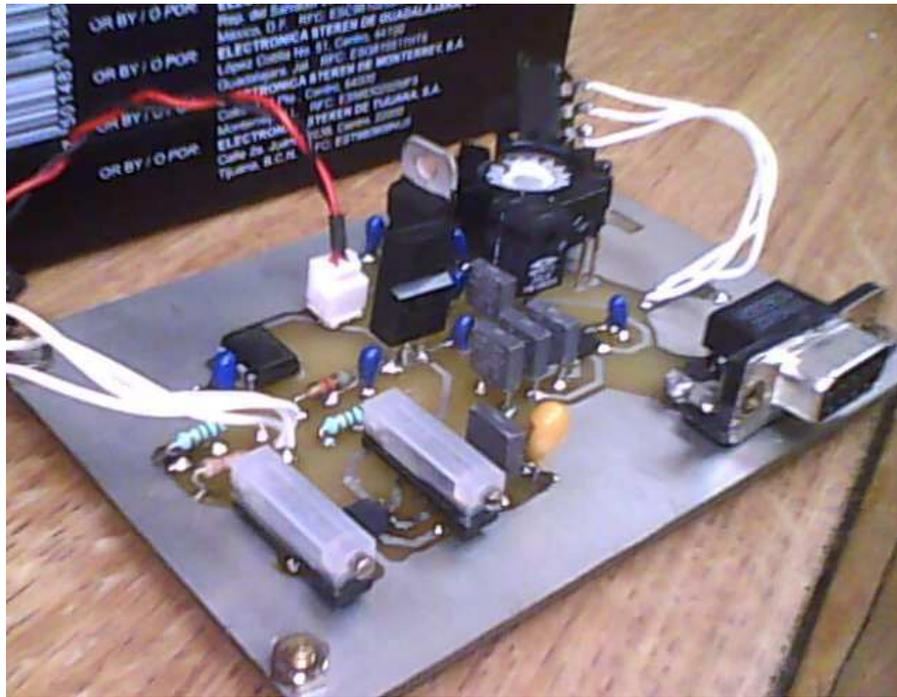


Figura 16. Circuito de prueba de la fuente de Howland II del diseño propuesto, vista lateral izquierda.

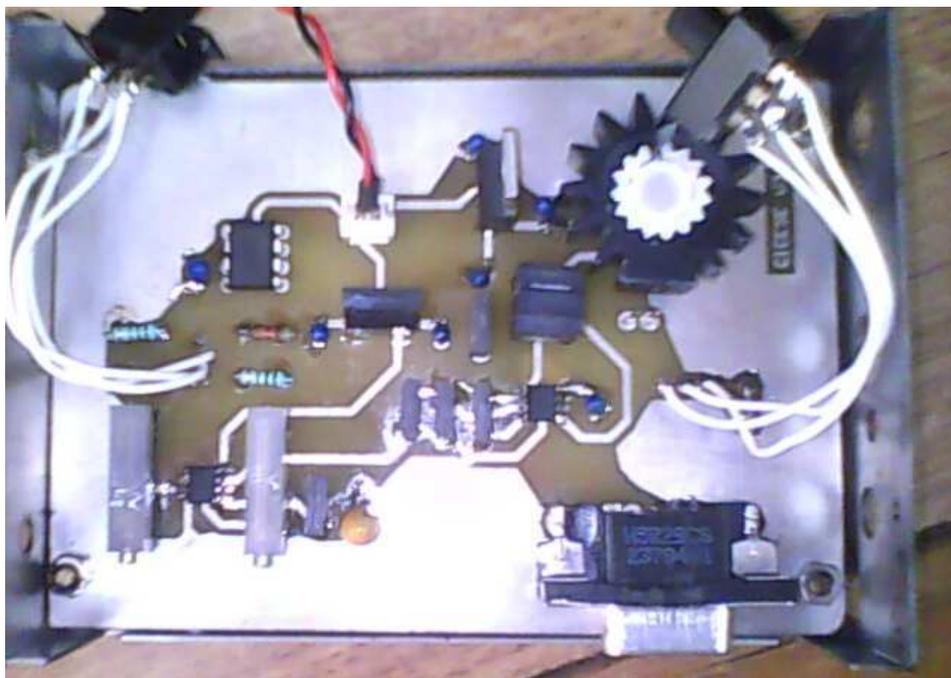


Figura 17. Circuito de prueba de la fuente de Howland II del diseño propuesto, vista superior.

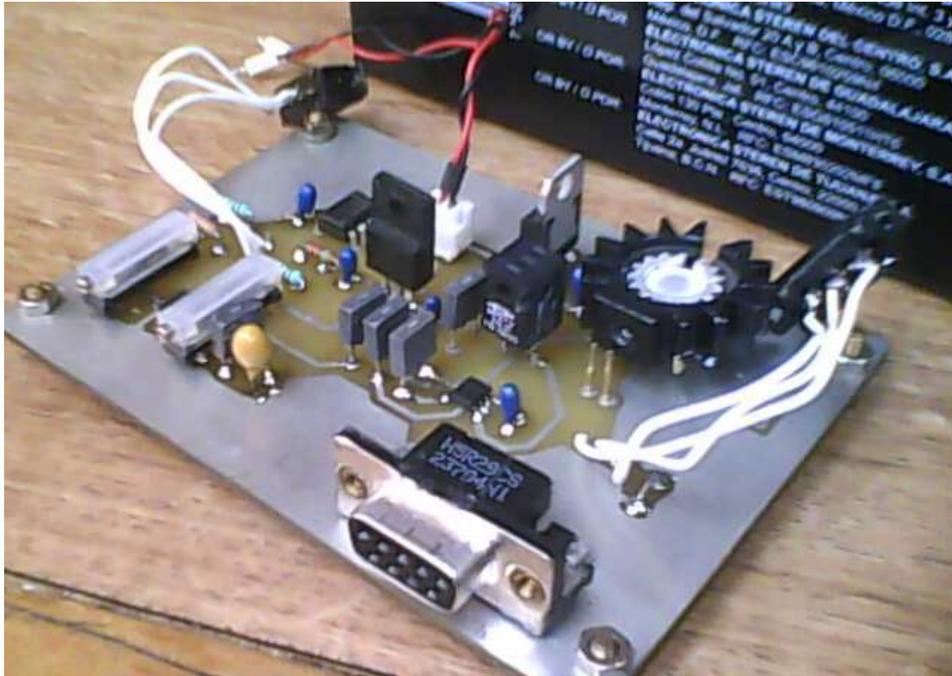


Figura 18. Circuito de prueba de la fuente de Howland II del diseño propuesto, vista lateral derecha.

IV.3 Resumen

En este capítulo se presentaron las simulaciones realizadas en el programa PSPICE, el diagrama esquemático y la mascarilla del circuito. Se mostró el circuito de prueba de la fuente de Howland II del diseño propuesto. En el siguiente capítulo se muestran los resultados del cálculo de ruido, de la sensibilidad y de la respuesta transitoria de la fuente propuesta.

Capítulo V

Cálculo del ruido en la fuente propuesta

Primero, en la sección V.1 se muestran los resultados teóricos del análisis de ruido en cada componente del circuito que se realizó en este proyecto de tesis.

En la siguiente sección se muestra el cálculo de la sensibilidad realizado con la ecuación (25) que se mostró en el capítulo III, sección III.3; también se presentan algunas gráficas que representan el incremento de la corriente de salida dependiente de la sensibilidad calculada y del componente que se varía (R_1, R_2, \dots ,etc).

Más adelante se presenta la respuesta transitoria del circuito, tomando en cuenta que se necesita tener un arranque suave al iniciar el funcionamiento de la fuente de corriente, ya que los cambios bruscos de corriente de alimentación, pueden dañar el diodo láser.

V.1 Análisis de ruido

En esta sección se presenta el análisis teórico de ruido en la fuente de Howland II, se muestran los diferentes tipos de ruido considerados, y el procedimiento con el cual se calculó la densidad de ruido total.

V.1.1 Ruido en las resistencias

Para el cálculo del ruido en las resistencias, se tomó como referencia la ecuación (27):

$$I_{term} = \sqrt{\frac{4kTB}{R}}, \quad (27)$$

donde

k : Constante de Boltzmann (Joules/K),

T : Temperatura absoluta (kelvin),

B : Anchura de banda (Hertz),

R : Resistencia (ohms).

A continuación, en la tabla III se muestra la aportación de ruido que tiene cada resistencia en el circuito de la fuente propuesta.

Tabla III. Ruido de corriente en las resistencias del circuito de la fuente propuesta.

Resistencia	Valor	Ruido de corriente	(Ruido de corriente) ²
R_1	$1k\Omega$	$1.28 * 10^{-9} A$	$1.65 * 10^{-19} A^2$
R_2	$1k\Omega$	$1.28 * 10^{-9} A$	$1.65 * 10^{-19} A^2$
R_3	$1k\Omega$	$1.28 * 10^{-9} A$	$1.65 * 10^{-19} A^2$
R_4	$1k\Omega$	$1.28 * 10^{-9} A$	$1.65 * 10^{-19} A^2$
R_x	4Ω	$2.03 * 10^{-8} A$	$4.11 * 10^{-16} A^2$
R_c	$1k\Omega$	$1.28 * 10^{-9} A$	$1.65 * 10^{-18} A^2$
R_{a1}	$10k\Omega$	$4.06 * 10^{-10} A$	$1.65 * 10^{-19} A^2$
R_{a2}	$3.3k\Omega$	$7.06 * 10^{-10} A$	$4.99 * 10^{-19} A^2$
R_{b1}	$5.1k\Omega$	$5.68 * 10^{-10} A$	$3.23 * 10^{-19} A^2$
R_{b2}	$10k\Omega$	$4.06 * 10^{-10} A$	$1.65 * 10^{-19} A^2$

El total de la suma del ruido de corriente al cuadrado de las resistencias i_{term}^2 es $4.21 * 10^{-16} A^2$.

V.1.2 Ruido en el amplificador operacional

La aportación de ruido del amplificador operacional está definida por el fabricante (MAXIM, 2010); la densidad de ruido de corriente que se especifica es para una frecuencia de $1KHz$.

Para obtener el ruido de corriente del amplificador se utiliza la ecuación (28)

$$i_{amp} = Dri\sqrt{fr}, \quad (28)$$

donde

i_{amp} : Corriente de ruido del amplificador operacional (amperios),

\mathbf{Dri} : Densidad de ruido de corriente del amplificador operacional (amperios/ $\sqrt{\text{Hertz}}$),

\mathbf{fr} : Frecuencia específica de la densidad de ruido del amplificador operacional (Hertz).

La densidad de ruido de corriente del amplificador operacional es $0.5fA/\sqrt{Hz}@1KHz$, por lo que el ruido de corriente del amplificador es:

$$ri_{amp} = 0.5fA/\sqrt{Hz}\sqrt{1KHz} = 15.81 * 10^{-15}. \quad (29)$$

Como se utilizan tres amplificadores operacionales, el ruido de corriente al cuadrado que aportan es: $i_{amp}^2 = 750 * 10^{-30} A^2$.

V.1.3 Ruido 1/f

Este ruido se le atribuye al transistor y se calcula con la siguiente ecuación:

$$I_f = \sqrt{\frac{2qf_L I_B}{f}}, \quad (30)$$

donde

I_f : Ruido 1/f (amperios),

\mathbf{q} : Carga del electrón (coulombs),

f_L : Constante de frecuencia con valor de $3.7KHz$ a $7MHz$ (Hertz),

I_B : Corriente de base (amperios),

\mathbf{f} : Frecuencia de operación (Hertz).

Los valores de la ganancia del transistor (β) y de f , se tomaron de la hoja de datos del fabricante. La corriente de base (I_B), depende de la corriente I_c y de β , como lo muestra la bien conocida ecuación (31):

$$I_B = \frac{I_c}{\beta}, \quad (31)$$

donde

I_c : Corriente de colector del transistor (amperios),

I_B : Corriente de base del transistor (amperios),

β : Ganancia del transistor (adimensional).

Es importante mencionar que se realizó una variación del valor de f_L , del valor máximo ($7MHz$) a su valor mínimo ($3.7KHz$), lo cual no provocó modificaciones significativas en el resultado final del cálculo del ruido $1/f$.

A continuación se presentan en la tabla IV cuatro niveles de corriente de I_c y de I_B , que corresponden a los diferentes valores de β .

Tabla IV. Relación entre I_c e I_B .

Corriente I_c	β	Corriente I_B
$20mA$	90	$222.22\mu A$
$100mA$	100	$1mA$
$200mA$	100	$2mA$
$500mA$	50	$10mA$

Ahora, para calcular la aportación del ruido $1/f$ se utiliza la ecuación (30), y como se tienen cuatro niveles de corriente de I_B , se presentan los resultados en la tabla V.

Tabla V. Ruido de corriente $1/f$ del circuito de la fuente propuesta.

Corriente	Ruido $1/f$	(Ruido $1/f$) ²
$20mA$	$1.03 * 10^{-10} A$	$1.07 * 10^{-20} A^2$
$100mA$	$2.19 * 10^{-10} A$	$4.8 * 10^{-20} A^2$
$200mA$	$3.10 * 10^{-10} A$	$9.6 * 10^{-20} A^2$
$500mA$	$6.93 * 10^{-10} A$	$4.8 * 10^{-19} A^2$

El ruido de corriente $1/f$ al cuadrado que aporta la fuente para una corriente I_c de $20mA$ es de: $1.0667 * 10^{-20} A^2$.

V.1.4 Ruido de granalla

El ruido de granalla se calculó con la ecuación (32):

$$I_g = \sqrt{(2qI_{dc}) B}, \quad (32)$$

donde

q : Carga del electrón (coulombs),

I_{dc} : Promedio de corriente en c.d. (amperios),

B : Anchura de banda (Hertz).

Este se hizo para los niveles de corriente de: $20mA$, $100mA$, $200mA$ y $500mA$.

A continuación, en la tabla VI, se muestra la aportación de ruido que tiene cada resistencia en el circuito de la fuente propuesta.

Tabla VI. Ruido de corriente de granalla del circuito de la fuente propuesta.

Corriente	Ruido de granalla	(Ruido de granalla) ²
$20mA$	$1.39 * 10^{-8}A$	$1.92 * 10^{-16}A^2$
$100mA$	$3.10 * 10^{-8}A$	$9.6 * 10^{-16}A^2$
$200mA$	$4.38 * 10^{-8}A$	$1.92 * 10^{-15}A^2$
$500mA$	$6.93 * 10^{-8}A$	$4.8 * 10^{-15}A^2$

El ruido de corriente de granalla al cuadrado que aporta la fuente para una corriente I_c de $20mA$ es de: $1.92 * 10^{-16}A^2$.

V.1.5 Ruido de corriente total del circuito

El ruido de corriente total del circuito se calculó con la ecuación (33),

$$\sqrt{i_{1eficaz}^2 + i_{2eficaz}^2 + \dots i_{neficaz}^2}. \quad (33)$$

Al sustituir los valores antes obtenidos, para una corriente de $20mA$, se obtiene:

$$\sqrt{4.21 * 10^{-16} + 750 * 10^{-30} + 1.07 * 10^{-20} + 1.92 * 10^{-16}} = 24.76 * 10^{-9}A. \quad (34)$$

El ruido de corriente total del circuito para la corriente I_c de $20mA$ es de: $I_{rt} = 24.76 * 10^{-9}A$.

V.1.6 Ruido de corriente total del circuito en dBm

Para calcular el ruido total de *watts* a *dBm* se utilizó la ecuación (35).

$$dBm = 10 \log_{10} \frac{(I_{rt}^2)(50\Omega)}{1mW}, \quad (35)$$

donde I_{rt} es el ruido de corriente total del circuito.

Para una corriente I_c de $20mA$ el ruido total de corriente es de $I_{rt} = 24.76 * 10^{-9}A$, que al sustituir en la ecuación (35), se obtiene:

$$dBm = 10 \log_{10} \frac{(24.76x10^{-9}A^2)(50\Omega)}{1mW} = -105.14dBm. \quad (36)$$

A continuación, en la tabla VII, se muestran los resultados del cálculo de ruido y su equivalente en dBm , para los cuatro niveles de corriente.

Tabla VII. Ruido de corriente total del circuito de la fuente propuesta.

Corriente	Ruido de corriente (A)	Ruido de corriente (dBm)
$20mA$	$24.76 * 10^{-9}A$	-105.14 dBm
$100mA$	$37.16 * 10^{-9}A$	-101.61 dBm
$200mA$	$48.38 * 10^{-9}A$	-99.32 dBm
$500mA$	$72.26 * 10^{-9}A$	-95.83 dBm

V.1.7 Conclusiones parciales

Existen tres tipos de ruido que más afectan al circuito: el ruido térmico, el ruido $1/f$ y el ruido de granalla. El primero no varía con respecto a la corriente, por lo que se considera constante. Sin embargo, los otros dos sí varían con respecto a la corriente.

Como conclusión del análisis de ruido, el ruido de granalla aportó más ruido al circuito en función de la corriente de salida. Por otro lado, el ruido $1/f$ tiene variaciones pequeñas, por lo que afecta menos al circuito.

V.2 Cálculo de la sensibilidad

Como se explicó en el capítulo III, subsección III.3, la sensibilidad del circuito final se calculó con la ecuación (25), obtenida del análisis del circuito de la figura 19. Al aplicar dicha ecuación a la ecuación (37), se obtiene la sensibilidad.

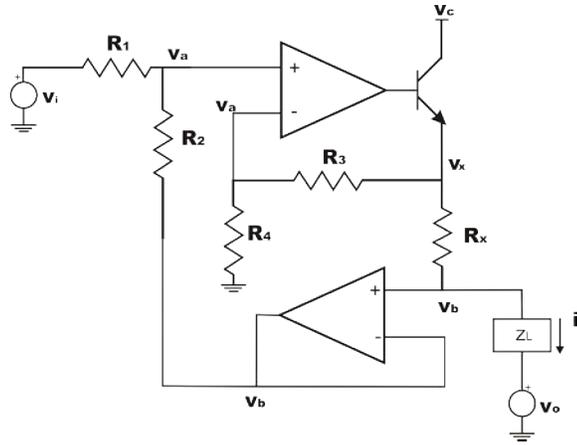


Figura 19. Fuente de Howland II del diseño propuesto.

Del análisis realizado al circuito de la figura 19 se obtuvo la siguiente ecuación:

$$i_L = \frac{V_i [R_2 (R_3 + R_4)] + V_o (R_1 R_3 - R_2 R_4)}{R_x R_4 (R_1 + R_2) - Z_L (R_1 R_3 - R_2 R_4)}. \quad (37)$$

A continuación se presentan los resultados que se obtuvieron al calcular la sensibilidad con la variación de cada una de las resistencias del circuito presentado en la figura 19.

Para la sensibilidad con respecto a R_1 , la ecuación obtenida es:

$$S_{R_1}^{i_L} = \frac{z_L - R_x}{2R_x}, \quad (38)$$

para la sensibilidad con respecto a R_2 , la ecuación obtenida es:

$$S_{R_2}^{i_L} = \frac{-z_L + R_x}{2R_x}, \quad (39)$$

para la sensibilidad con respecto a R_3 , la ecuación obtenida es:

$$S_{R_3}^{i_L} = \frac{z_L + R_x}{2R_x}, \quad (40)$$

para la sensibilidad con respecto a R_4 , la ecuación obtenida es:

$$S_{R_4}^{i_L} = \frac{-z_L - R_x}{2R_x}, \quad (41)$$

para la sensibilidad con respecto a R_x , la ecuación obtenida es:

$$S_{R_x}^{i_L} = -1, \quad (42)$$

para la sensibilidad con respecto a z_L , la ecuación obtenida es:

$$S_{z_L}^{i_L} = 0. \quad (43)$$

Conocida la sensibilidad de la corriente de salida con respecto a cada resistencia se calculó la variación de la corriente de salida.

Al aplicar la ecuación (26) a la corriente i_L , se obtuvo:

$$\Delta i_L = \frac{i_L}{R} \Delta R S_R^{i_L}, \quad (44)$$

y sustituyendo cada una de las sensibilidades calculadas anteriormente en la ecuación (44), se obtuvieron las siguientes ecuaciones: para el cálculo de la sensibilidad de i_L con respecto a R_1 :

$$\Delta i_L = \frac{z_L v_i \Delta R_1 - v_i \Delta R_1 R_x}{2R_1 R_x^2}, \quad (45)$$

para el cálculo de la sensibilidad de i_L con respecto a R_2 :

$$\Delta i_L = \frac{-z_L v_i \Delta R_2 + v_i \Delta R_2 R_x}{2R_2 R_x^2}, \quad (46)$$

para el cálculo de la sensibilidad de i_L con respecto a R_3 :

$$\Delta i_L = \frac{z_L v_i \Delta R_3 + v_i \Delta R_3 R_x}{2R_3 R_x^2}, \quad (47)$$

para el cálculo de la sensibilidad de i_L con respecto a R_4 :

$$\Delta i_L = \frac{-z_L v_i \Delta R_4 - v_i \Delta R_4 R_x}{2R_1 R_x^2}, \quad (48)$$

para el cálculo de la sensibilidad de i_L con respecto a R_x :

$$\Delta i_L = \frac{v_i \Delta R_x}{R_x^2}, \quad (49)$$

para el cálculo de la sensibilidad de i_L con respecto a z_L :

$$\Delta i_L = 0. \quad (50)$$

La variable z_L no está definida hasta este momento, sólo se sabe que es la carga conectada a la salida de la fuente de corriente, la cual como ya se especificó, está diseñada para utilizar diodos láser como elementos de salida (z_L), por lo que se toma como referencia la resistencia dinámica del diodo para definir el valor de z_L .

La resistencia dinámica se calcula con la siguiente ecuación:

$$r_d = \frac{25mV}{I_d}, \quad (51)$$

donde I_d es la corriente que circula por el diodo y está dada por la ecuación (52):

$$I_d = \frac{v_i}{R_x}, \quad (52)$$

la cual se sustituye en la ecuación (51), y se obtiene:

$$z_L = \frac{R_x 25mV}{v_i}. \quad (53)$$

Si se definen los valores de $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 1000\Omega$, $\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = 10\Omega$, $R_x = 4\Omega$, $\Delta R_x = 0.04\Omega$, y si se sustituyen estos valores y la ecuación

(53) en las ecuaciones (45), (46), (47), (48) y (49), da como resultado las siguientes ecuaciones: para la sensibilidad de i_L con respecto a R_1 :

$$\Delta i_L = \frac{1 - 40v_i}{32000}, \quad (54)$$

para la sensibilidad de i_L con respecto a R_2 :

$$\Delta i_L = \frac{-1 + 40v_i}{32000}, \quad (55)$$

para la sensibilidad de i_L con respecto a R_3 :

$$\Delta i_L = \frac{1 + 40v_i}{32000}, \quad (56)$$

para la sensibilidad de i_L con respecto a R_4 :

$$\Delta i_L = \frac{-1 - 40v_i}{32000}, \quad (57)$$

para la sensibilidad de i_L con respecto a R_x :

$$\Delta i_L = \frac{0.04v_i}{16}. \quad (58)$$

De las ecuaciones anteriores se toma v_i como variable desde $0-2v$; con esta condición se obtienen las siguientes gráficas.

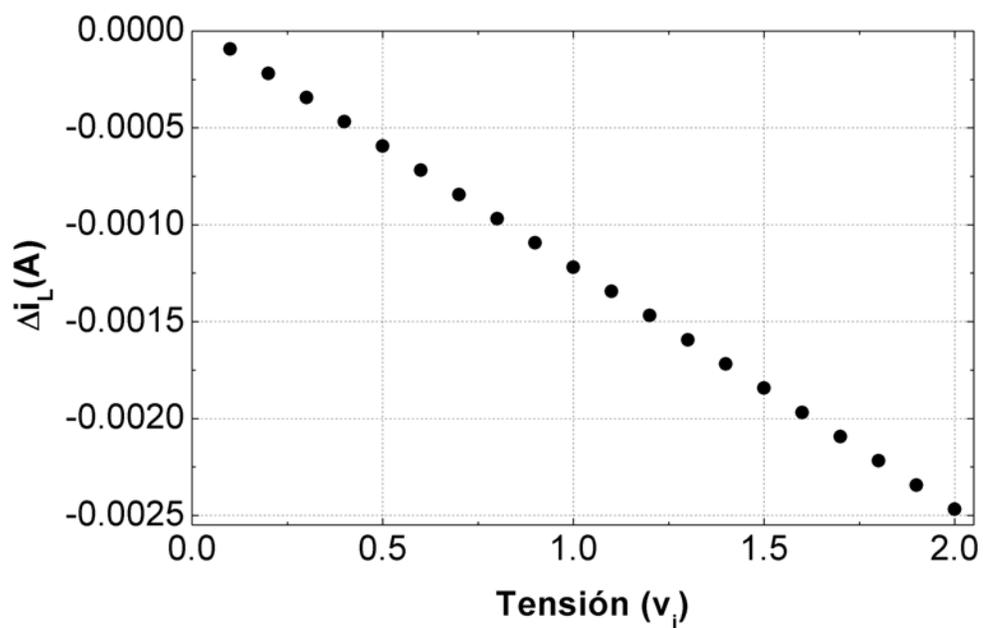


Figura 20. Variación de la corriente de salida I_l dada $\Delta R_1 = 10\Omega$ con diferentes valores de v_i .

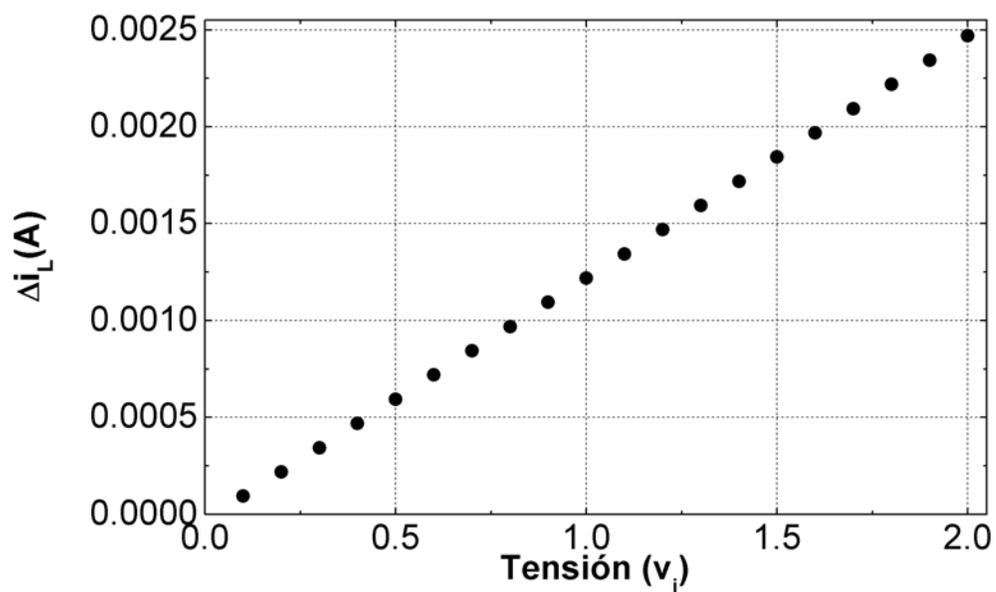


Figura 21. Variación de la corriente de salida I_l dada $\Delta R_2 = 10\Omega$ con diferentes valores de v_i .

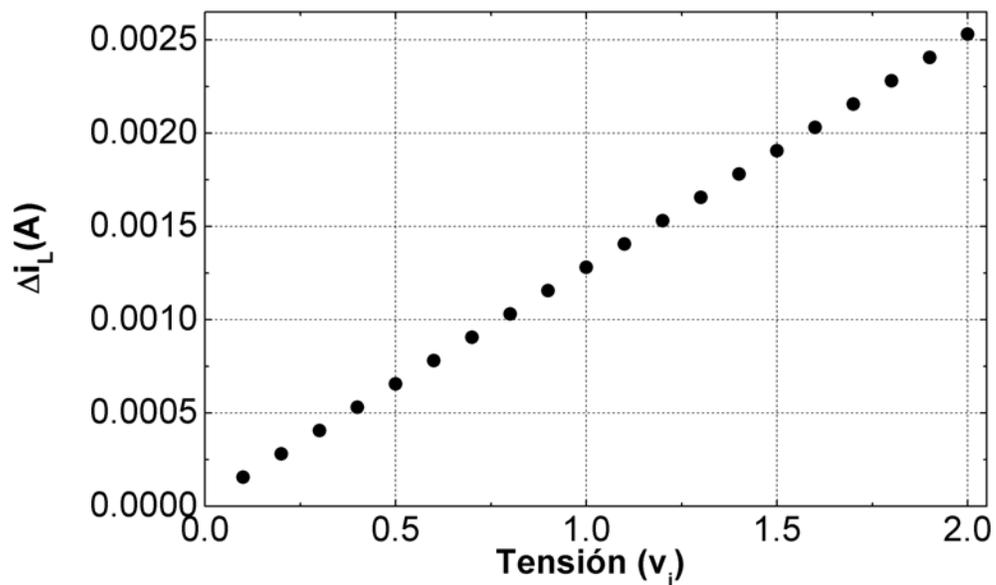


Figura 22. Variación de la corriente de salida I_l dada $\Delta R_3 = 10\Omega$ con diferentes valores de v_i .

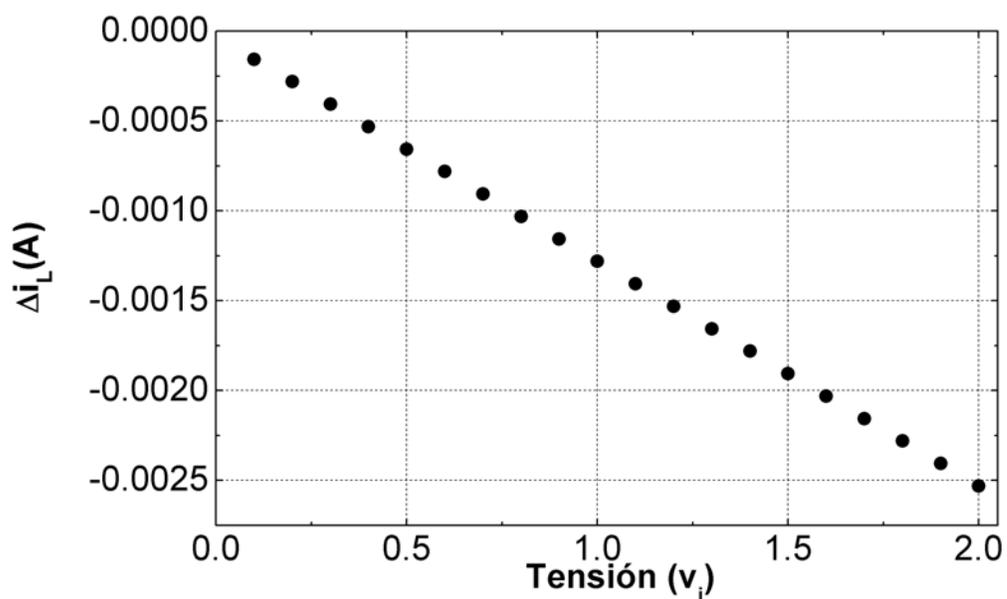


Figura 23. Variación de la corriente de salida I_l dada $\Delta R_4 = 10\Omega$ con diferentes valores de v_i .

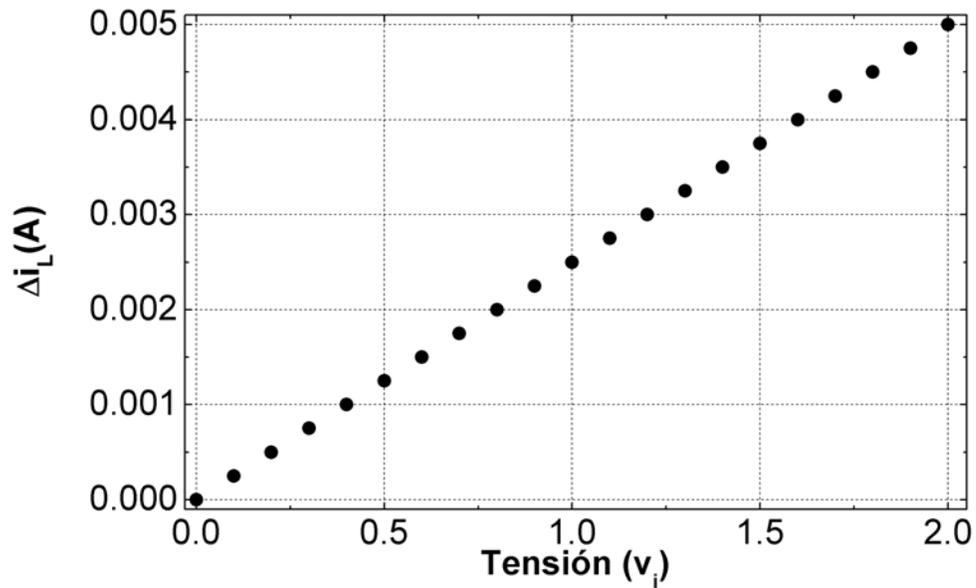


Figura 24. Variación de la corriente de salida I_l dada $\Delta R_x = 0.04\Omega$ con diferentes valores de v_i .

Como se observa en las gráficas anteriores, la variación que registra Δi_L depende directamente de v_i dado que la variable z_L también depende de v_i cuando se tiene un incremento ΔR dado de cualquier resistencia en el circuito propuesto. Si el incremento ΔR es cero el sistema es insensible a las variaciones de v_i (c.f., figura 25).

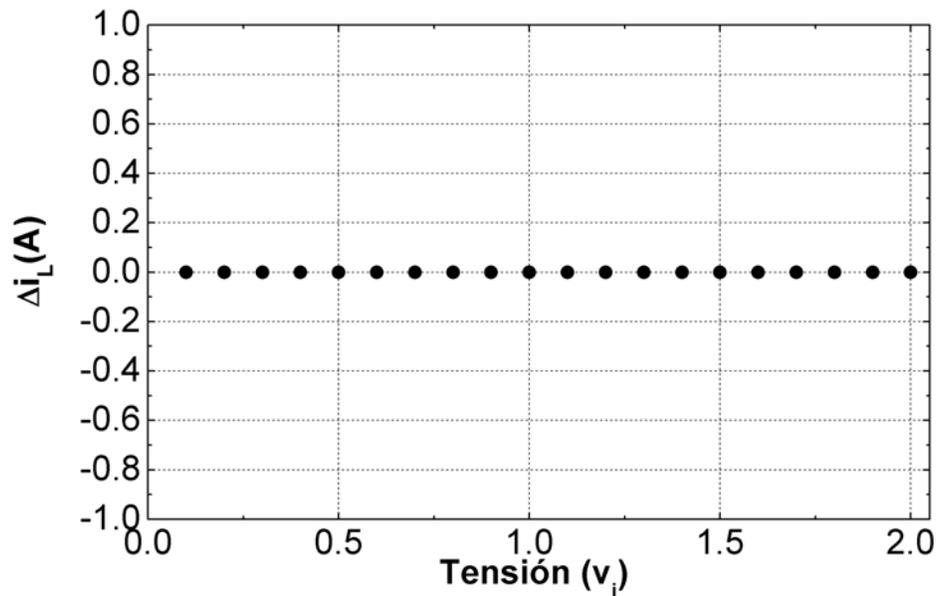


Figura 25. Variación de la corriente de salida I_l cuando $\Delta R1 = 0\Omega$ con diferentes valores de v_i .

V.3 Cálculo de la respuesta transitoria

Como se mostró en el capítulo III, sección III.4, la respuesta transitoria del circuito presenta información importante, la cual se puede observar en la figura 26.

Como se mencionó anteriormente, la señal de entrada al circuito es un escalón de $2v$, con la cual se obtuvo la respuesta transitoria que se presenta en la figura 26.

En el análisis de la señal de salida de la fuente de Howland II sólo se calculan las siguientes especificaciones de la respuesta transitoria, ya que la respuesta es la de un sistema de primer orden (c.f., con la figura 26).

1. Tiempo de retardo, (t_d).
2. Tiempo de levantamiento, (t_r).

3. Tiempo de asentamiento, (t_s).

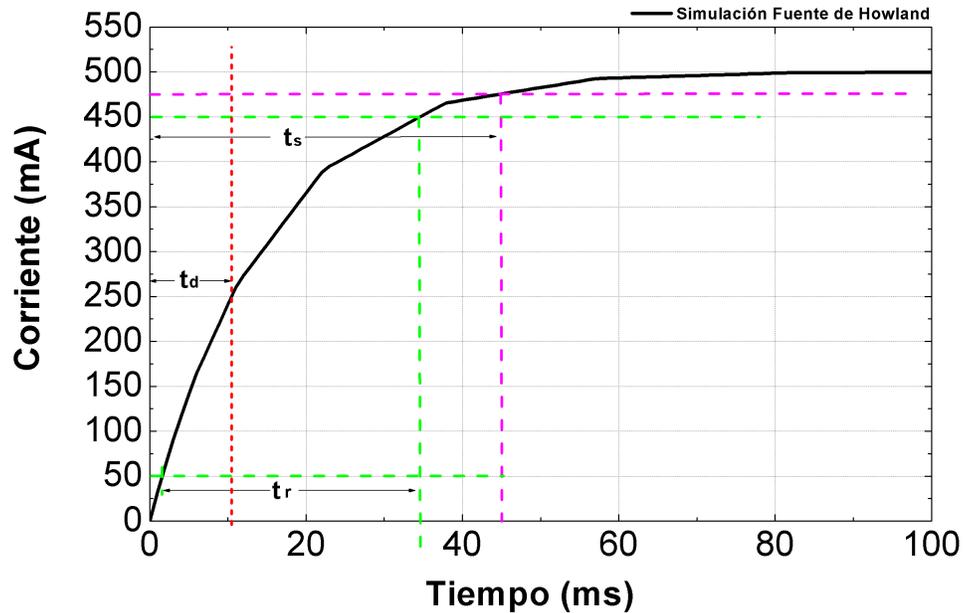


Figura 26. Respuesta transitoria de la fuente de Howland II simulada.

De la gráfica de la figura 26 se encontraron los siguientes valores:

$$t_d = 10.39ms,$$

$$t_r = 32.99ms,$$

$$t_s = 44.15ms.$$

V.4 Resumen

En este capítulo se presentaron los resultados de los cálculos del ruido de cada componente de la fuente propuesta, de la sensibilidad y de la respuesta transitoria.

En el siguiente capítulo se muestran los resultados experimentales de la medición del ruido en las fuentes : LDX-3620, LDC-205 y de Howland II.

Capítulo VI

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados de los experimentos realizados en el laboratorio.

En la sección VI.1 se presentan los resultados experimentales, que muestran los niveles de ruido de la fuente de laboratorio LDX-3620 que se tomó como referencia como fuente de bajo ruido para la realización de este proyecto. También se muestran gráficas en las que se observan los niveles de ruido del diseño de la fuente propuesta. Al igual, se muestran los niveles de ruido de la fuente LDC-205 (Thorlabs, 2010) con niveles “normales” de ruido.

Por último, en la sección VI.2 se muestran los resultados, tanto del uso de la fuente de Howland II, como de la fuente LDX-3620, al alimentar un dispositivo optoelectrónico.

VI.1 Resultados experimentales de la medición de ruido

En esta sección se presentan los resultados experimentales de la medición de ruido realizada en el taller de electrónica del Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones del CICESE (D.E.T.). Para la medición de ruido se utilizó un analizador de espectros

picoscopio-3000 (Picotech, 2010), una computadora y una carga de prueba, así como tres fuentes de corriente: una fuente de bajo ruido (LDX-3620), una fuente que no es de bajo ruido (LDC-205) y la fuente de Howland II, con la finalidad de comparar sus comportamientos, mismos que se mostrarán en el capítulo VII.

VI.1.1 Procedimiento de medición de ruido

La medición de ruido de la fuente LDX-3620, de la LDC-205 y de la de Howland II, se realizó siguiendo un procedimiento que se detalla más adelante; en la figura 27 se muestra el diagrama a cuadros correspondiente a las conexiones para hacer la medición de cada fuente.

- Primero se conectó el equipo necesario para realizar la prueba de acuerdo con el diagrama a cuadros de la figura 27.
- Se encendió la computadora y se conectó el picoscopio 3000.
- Se abrió el programa de adquisición de datos del picoscopio 3000.
- Se alimentó la carga con la corriente de la fuente bajo prueba y se midió con el picoscopio 3000 el espectro producido.
- Se guardaron los datos del espectro producidos para su posterior análisis.

La medición de ruido se realizó en cada fuente y en los niveles de corriente de: $20mA$, $100mA$, $200mA$ y $500mA$.

A continuación se presenta el resultado de la medición del ruido de cada una de las fuentes con una corriente de $500mA$.

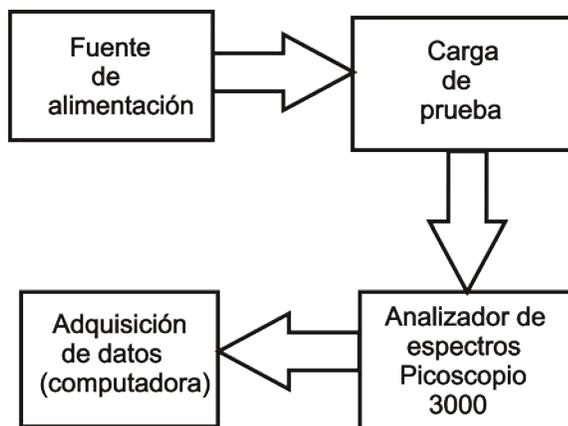


Figura 27. Diagrama a cuadros para la medición del ruido en las fuentes.

VI.1.2 Medición de niveles de ruido de la fuente LDC-205

De los resultados experimentales obtenidos en la medición del ruido de la fuente de LDC-205 se obtuvieron los resultados que se presentan en la figura 28.

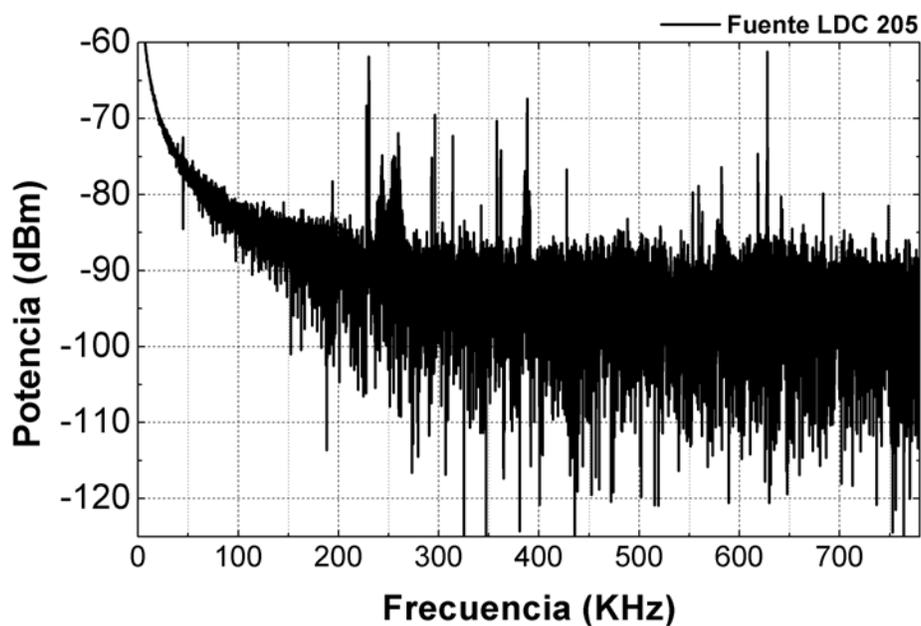


Figura 28. Medición de ruido de la fuente LDC-205.

De los datos obtenidos en la medición del ruido de la fuente LDC-205 se obtuvieron los siguientes datos estadísticos.

Tabla VIII. Parámetros estadísticos de la medición de ruido de la fuente LDC-205.

Total de muestras	Media (dBm)	Desviación estándar	Mínimo (dBm)	Máximo (dBm)
16384	-90.05	8.68	-130.25	-6.97

VI.1.3 Medición de niveles de ruido de la fuente LDX-3620

De los resultados experimentales obtenidos en la medición del ruido de la fuente de LDX-3620 se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 29.

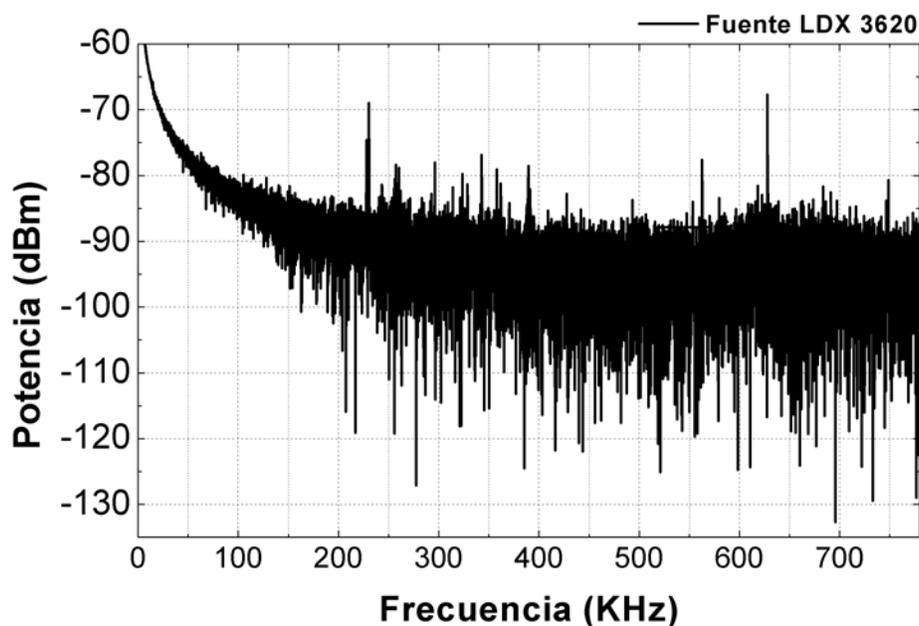


Figura 29. Medición de ruido de la fuente LDX-3620.

De los datos obtenidos en la medición del ruido de la fuente LDX-3620 se obtuvieron los siguientes datos estadísticos.

Tabla IX. Parámetros estadísticos de la medición de ruido de la fuente LDX-3620.

Total de muestras	Media (dBm)	Desviación estándar	Mínimo (dBm)	Máximo (dBm)
16384	-90.19	8.54	-132.71	-7.07

VI.1.4 Medición de niveles de ruido de la fuente de Howland II

De los resultados experimentales obtenidos en la medición del ruido de la fuente de Howland II se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 30.

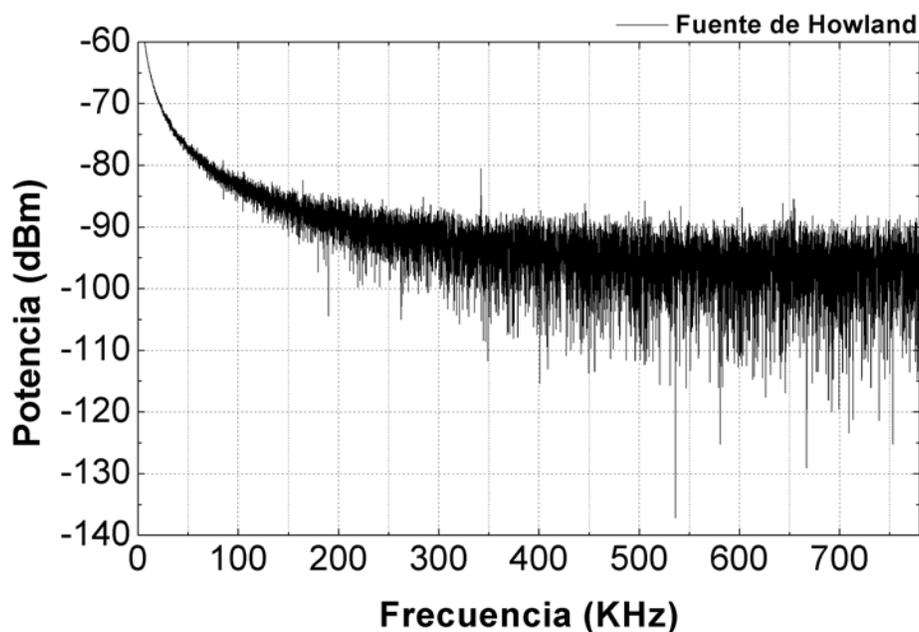


Figura 30. Medición de ruido de la fuente de Howland II.

De los datos obtenidos en la medición del ruido de la fuente Howland II se obtuvieron los siguientes datos estadísticos.

Tabla X. Parámetros estadísticos de la medición de ruido de la fuente de Howland II.

Total de muestras	Media (dBm)	Desviación estándar	Mínimo (dBm)	Máximo (dBm)
16384	-91.06	8.52	-137.21	-7.01

VI.2 Resultados experimentales utilizando la fuente con un dispositivo optoelectrónico

En esta sección se presenta el resultado experimental del funcionamiento de la fuente LDX-3620 y el de la fuente de Howland II cuando ambas alimentan un dispositivo optoelectrónico; en este caso, un amplificador óptico de semiconductor BOA-1004 (CO-VEGA, 2010).

Primero se presenta la medición de la potencia óptica y después la medición realizada con el analizador de espectros óptico.

VI.2.1 Medición de potencia óptica

Para la realización de esta medición se utilizó un medidor de potencia óptica OPM1 NOYES (Noyes, 2010).

En la figura 31 se presenta el diagrama a cuadros que muestra la forma como se

conectó el equipo para la medición.



Figura 31. Diagrama a cuadros de la medición realizada con el medidor de potencia óptica, que mide la potencia óptica del BOA-1004.

A continuación se presenta el procedimiento que se realizó para hacer la medición:

- Primero se conectó el equipo necesario para hacer la medición como se muestra en la figura 31.
- Se encendió el medidor de potencia óptica.
- Se encendió la fuente bajo prueba, se fijó el valor de la corriente hasta el nivel deseado y se tomó lectura de la potencia óptica desplegada en el medidor.
- Se repitió el punto anterior hasta obtener las mediciones necesarias.
- Se guardó los datos para su posterior análisis.

VI.2.1.1 Con la fuente LDX-3620

De la medición realizada con la fuente LDX-3620 se obtuvo la gráfica que se presenta en la figura 32.

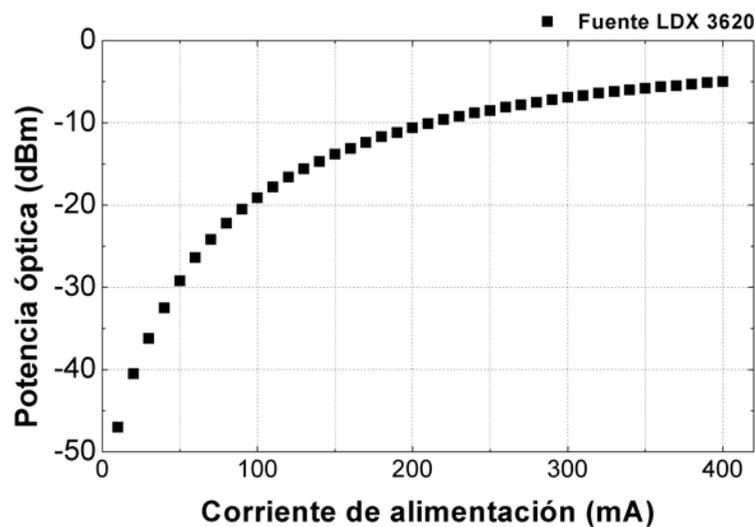


Figura 32. Medición de la potencia óptica del BOA-1004 alimentado con la fuente LDX-3620.

VI.2.1.2 Con la fuente de Howland II

Para la medición realizada con la fuente de Howland II se obtuvo la gráfica que se presenta en la figura 33.

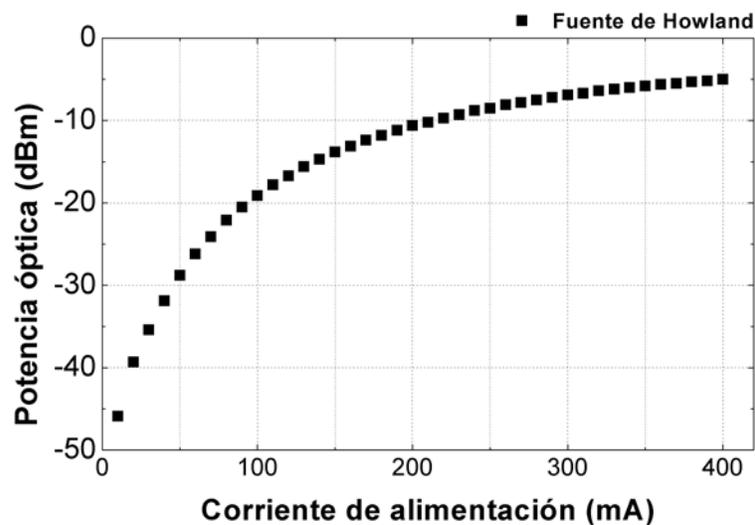


Figura 33. Medición de la potencia óptica del BOA-1004 alimentado con la fuente de Howland II.

VI.2.2 Medición de potencia con el analizador de espectros óptico

Para realizar esta medición se utilizó un analizador de espectros óptico HP 70004A (HP, 2010).

En la figura 34 se presenta el diagrama a cuadros que muestra la forma como se conectó el equipo para la medición.

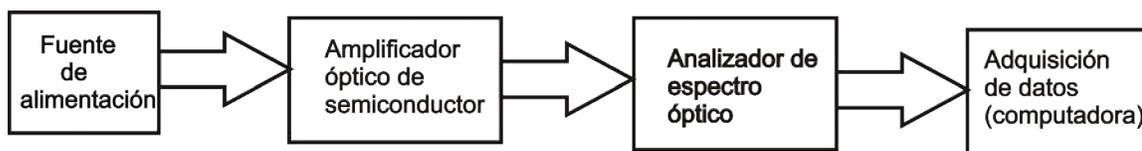


Figura 34. Diagrama a cuadros de la medición realizada con el analizador de espectro óptico que mide el espectro del BOA-1004.

A continuación se presenta el procedimiento que se realizó para hacer la medición:

- Primero se conectó el equipo necesario para hacer la medición como se muestra en la figura 34.
- Se encendió la computadora y se conectó la tarjeta de adquisición de datos del analizador a la computadora.
- Se ejecutó el programa con el cual se captó los datos.
- Se encendió la fuente bajo prueba y se aumentó la corriente hasta el nivel deseado.
- Se repitió el punto anterior hasta obtener las mediciones necesarias.

- Se guardó los datos para su posterior análisis.

VI.2.2.1 Con la fuente LDX-3620

De la medición realizada con la fuente LDX-3620 se obtuvo la gráfica que se presenta en la figura 35.

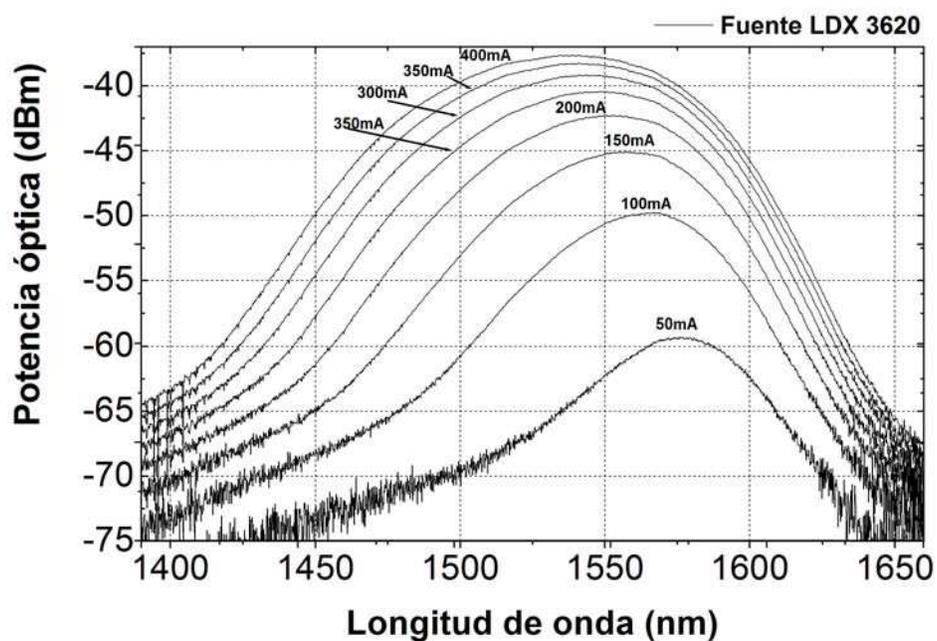


Figura 35. Medición del espectro óptico del BOA-1004 alimentado con la fuente LDX-3620.

VI.2.2.2 Con la fuente de Howland II

Para la medición realizada con la fuente de Howland II se obtuvo la gráfica que se presenta en la figura 36.

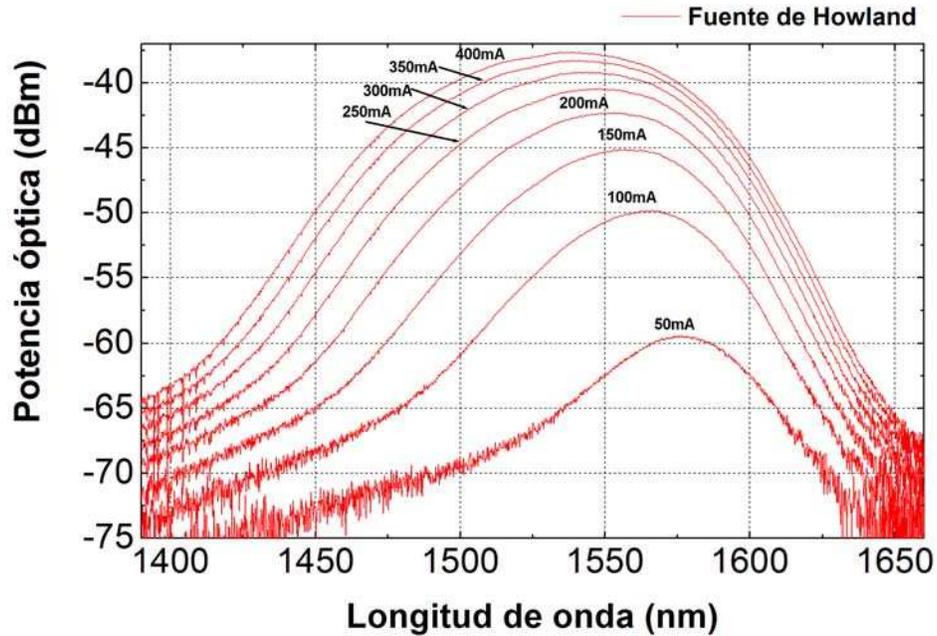


Figura 36. Medición del espectro óptico del BOA-1004 alimentado con la fuente de Howland II.

VI.3 Resumen

En este capítulo se presentaron los resultados de las mediciones de ruido realizadas a las fuentes LDX-3620, LDC-205 y de Howland II. También se presentó la medición de potencia óptica y la medición del espectro óptico, utilizando un dispositivo optoelectrónico (BOA-1004), alimentado con la fuente LDX-3620 y con la de Howland II. También se presentaron las características y especificaciones medidas de la fuente propuesta. En el siguiente capítulo se presenta la comparación de los resultados obtenidos de las mediciones. También se expone la conclusión a la que se llegó a partir de los resultados obtenidos de las comparaciones.

Capítulo VII

Discusión de resultados y conclusiones

En este capítulo se presenta la comparación de los resultados obtenidos en las mediciones presentadas en el capítulo anterior. Primero se muestra los niveles de ruido de las tres fuentes que se comparó (v.g., la de Howland II, la LDX-3620 y la LDC-205). La medición del ruido se realizó en cada fuente y en los niveles de corriente de: $20mA$, $100mA$, $200mA$ y $500mA$.

También se presenta la comparación de los resultados obtenidos de la medición de la potencia óptica; en esta medición sólo se utilizó la fuente LDX-3620 y la fuente de Howland II para alimentar el dispositivo optoelectrónico (BOA-1004). Para esta medición se utilizó el medidor de potencia óptica OPM1 NOYES (Noyes, 2010).

Después se presenta la comparación de los resultados obtenidos de la medición del espectro óptico; en esta medición se utilizó las fuentes LDX-3620 y la de Howland II para alimentar el dispositivo optoelectrónico (BOA-1004). Para la adquisición de datos se utilizó una tarjeta de National Instruments que se conectó al analizador de espectros óptico HP 70004A (HP, 2010).

Por último se exponen las conclusiones y aportaciones esta tesis, así como también las recomendaciones para el trabajo futuro.

VII.1 Comparación de los niveles de ruido

De los datos obtenidos de la medición del ruido en las tres fuentes con una corriente de $20mA$, se obtuvo la gráfica de la figura 37.

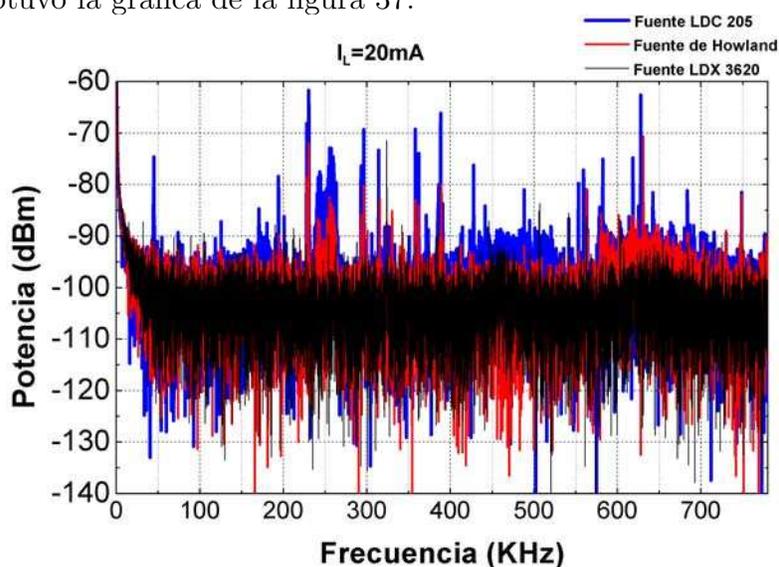


Figura 37. Comparación del nivel de ruido medido en las tres fuentes con una corriente de $20mA$.

En la tabla XI se presenta para su comparación, la información estadística obtenida de las mediciones de ruido de las tres fuentes y también el ruido calculado en la fuente de Howland II en el capítulo V.

Tabla XI. Parámetros estadísticos de la medición de ruido en las tres fuentes con una corriente de $20mA$.

Fuente	Total de muestras	Media (dBm)	Desviación estándar	Mínimo (dBm)	Máximo (dBm)
Howland II calculado	-----	-105.14	-----	-----	-----
Howland II medido	16384	-103.75	6.57	-150.61	-33.266
LDX-3620	16384	-102.11	6.72	-151.59	-33.97
LDC-205	16384	-99.70	7.11	-144.23	-35.72

De los datos obtenidos de la medición del ruido en las tres fuentes con una corriente de $100mA$, se obtuvo la gráfica de la figura 38.

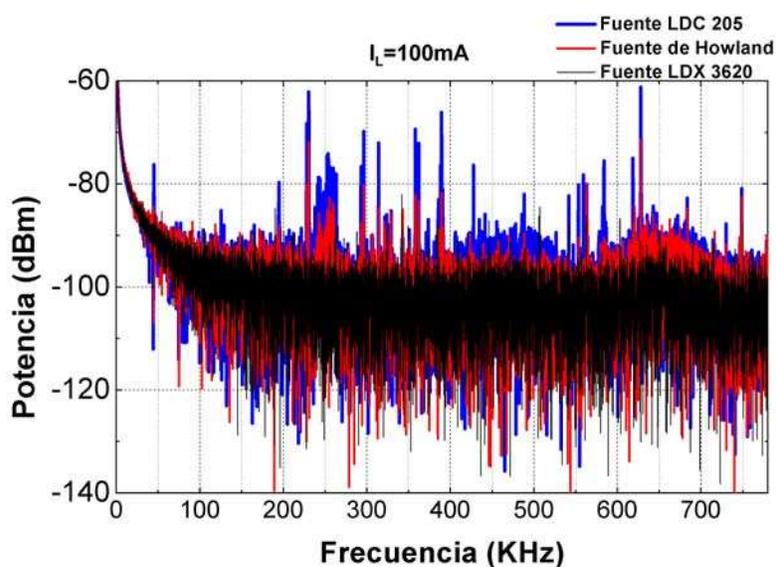


Figura 38. Comparación del nivel de ruido medido en las tres fuentes con una corriente de $100mA$.

En la tabla XII se presenta para su comparación, la información estadística obtenida de las mediciones de ruido de las tres fuentes y también el ruido calculado en la fuente de Howland II en el capítulo V.

Tabla XII. Parámetros estadísticos de la medición de ruido en las tres fuentes con una corriente de $100mA$.

Fuente	Total de muestras	Media (dBm)	Desviación estándar	Mínimo (dBm)	Máximo (dBm)
Howland II calculado	-----	-101.61	-----	-----	-----
Howland II medido	16384	-100.98	7.88	-138.21	-20.74
LDX-3620	16384	-99.50	7.86	-141.43	-20.43
LDC-205	16384	-97.74	7.84	-135.75	-21.05

De los datos obtenidos de la medición del ruido en las tres fuentes con una corriente de $200mA$, se obtuvo la gráfica de la figura 39.

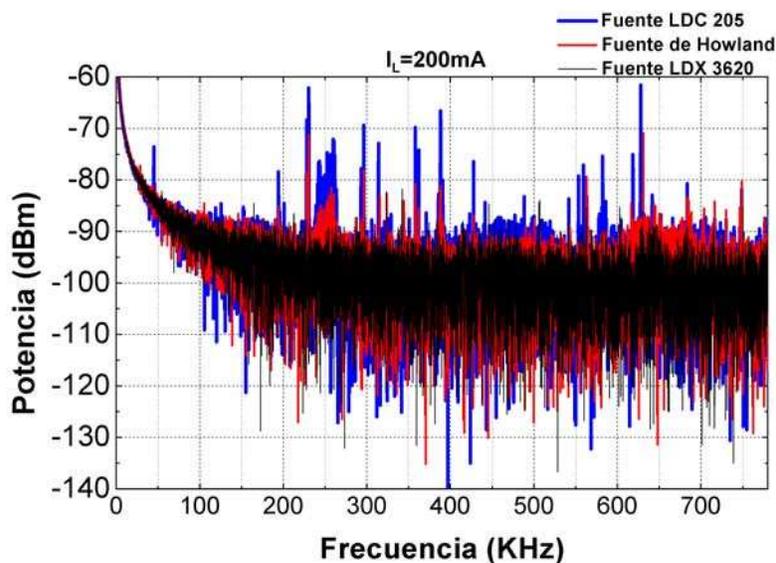


Figura 39. Comparación del nivel de ruido medido en las tres fuentes con una corriente de $200mA$.

En la tabla XIII se presenta para su comparación, la información estadística obtenida de las mediciones de ruido de las tres fuentes y también el ruido calculado en la fuente de Howland II en el capítulo V.

Tabla XIII. Parámetros estadísticos de la medición de ruido en las tres fuentes con una corriente de $200mA$.

Fuente	Total de muestras	Media (dBm)	Desviación estándar	Mínimo (dBm)	Máximo (dBm)
Howland II calculado	-----	-99.32	-----	-----	-----
Howland II medido	16384	-97.01	8.35	-136.680	-14.84
LDX-3620	16384	-96.04	8.18	-135.16	-14.76
LDC-205	16384	-95.27	8.23	-141.59	-14.99

De los datos obtenidos de la medición del ruido en las tres fuentes con una corriente de $500mA$, se obtuvo la gráfica de la figura 40.

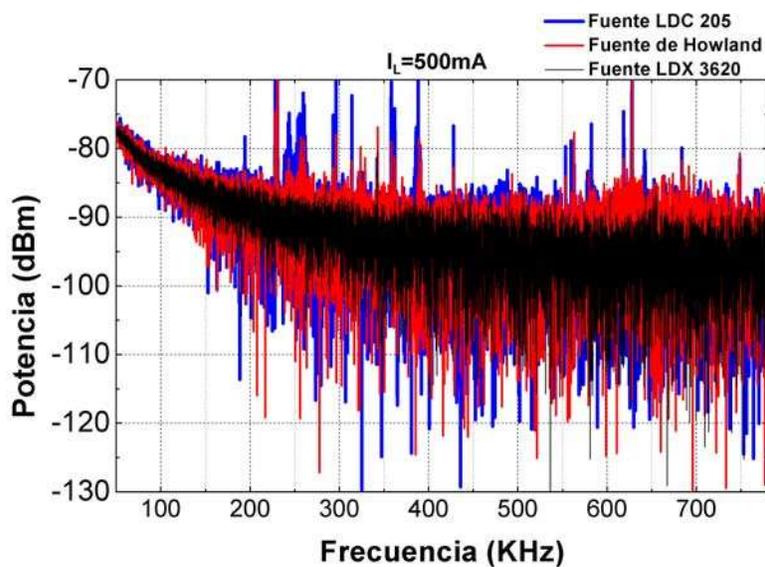


Figura 40. Comparación del nivel de ruido medido en las tres fuentes con una corriente de $500mA$.

En la tabla XIV se presenta para su comparación, la información estadística obtenida de las mediciones de ruido de las tres fuentes y también el ruido calculado en la fuente de Howland II en el capítulo V.

Tabla XIV. Parámetros estadísticos de la medición de ruido en las tres fuentes con una corriente de $500mA$.

Fuente	Total de muestras	Media (dBm)	Desviación estándar	Mínimo (dBm)	Máximo (dBm)
Howland II calculado	-----	-95.83	-----	-----	-----
Howland II medido	16384	-91.06	8.52	-137.21	-7.01
LDX-3620	16384	-90.19	8.54	-132.71	-7.08
LDC-205	16384	-90.05	8.68	-130.25	-6.97

VII.2 Comparación de la potencia óptica

De los datos obtenidos en la medición de potencia óptica del BOA-1004, alimentado con la fuente LDX-3620 y con la fuente de Howland II, se obtuvieron las gráficas de potencia en dBm (figura 41) y de potencia en mW (figura42).

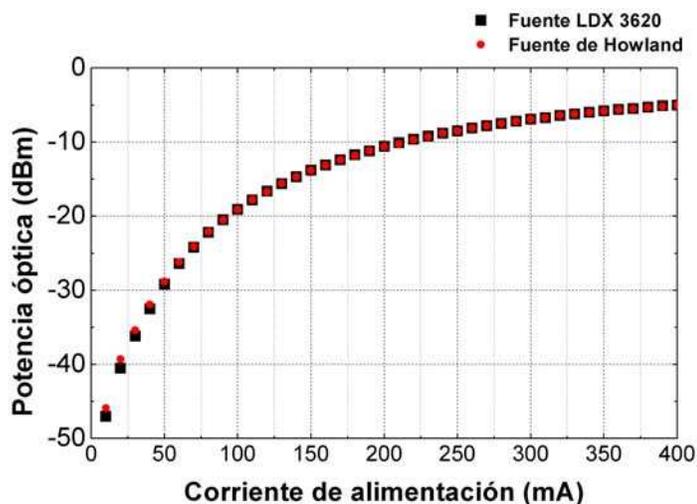


Figura 41. Comparación de la medición de potencia óptica en dBm del BOA-1004 alimentado con la fuente LDX-3620 y con la fuente de Howland II.

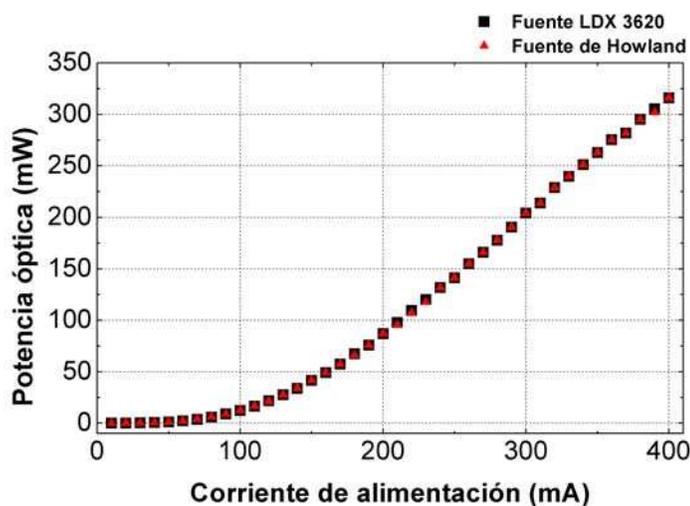


Figura 42. Comparación de la medición de potencia óptica en mW del BOA-1004 alimentado con la fuente LDX-3620 y con la fuente de Howland II.

VII.3 Comparación del espectro óptico

De la comparación de los datos obtenidos en la medición del espectro óptico del BOA-1004, cuando se alimentó con la fuente LDX-3620 y con la de Howland II, se obtuvo la gráfica de la figura 43.

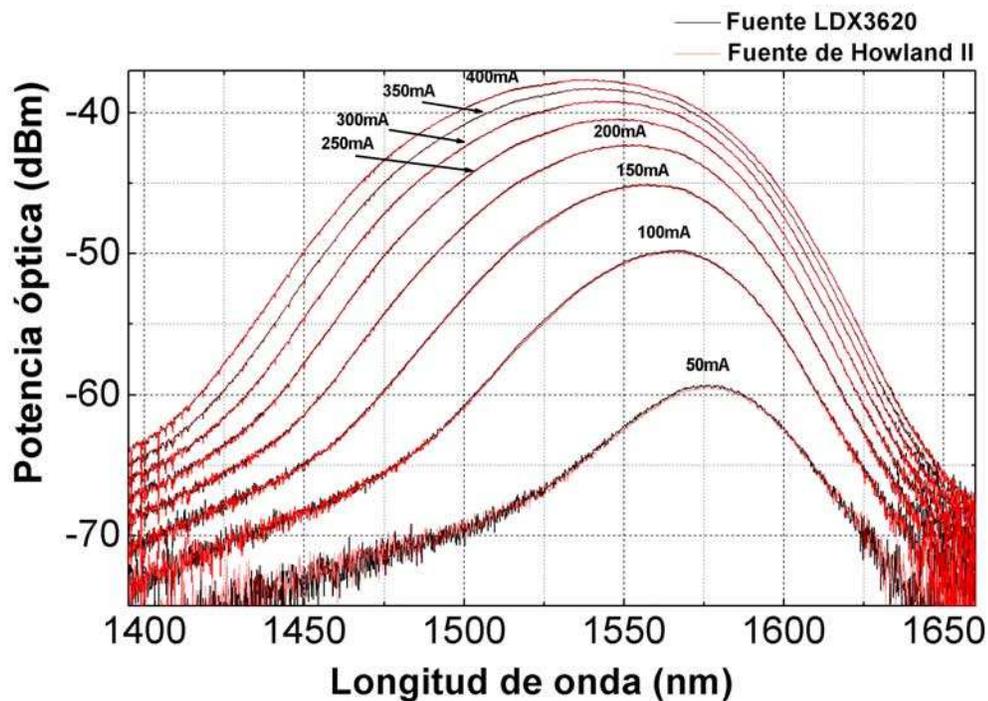


Figura 43. Comparación de la medición del espectro óptico del BOA-1004 alimentado con la fuente LDX-3620 y con la fuente de Howland II.

VII.4 Características y especificaciones de la fuente propuesta

VII.4.1 Características de la fuente propuesta

Las características son:

- Bajo ruido, mejorado con diseño con batería.
- Alta estabilidad de salida.
- Protección de límite de corriente.
- Dos intervalos de corriente: $0 - 200mA$ y $0 - 500mA$.

VII.4.2 Especificaciones de la fuente propuesta

A continuación se presentan las especificaciones de la fuente propuesta.

Tabla XV. Intervalo de corriente de la fuente propuesta.

Salida	0-200mA	0-500mA
Corriente de salida:	$0 - 200mA$	$0 - 500mA$
Tensión de cumplimiento:	≤ 5 volts	≤ 5 volts

Tabla XVI. Ruido de la fuente propuesta.

Ruido	
(Anchura de banda $5Hz - 780KHz$)	
Operación con batería	$720nA$ eficaz
(Anchura de banda $5Hz - 10KHz$)	
Operación con batería	$82nA$ eficaz

Tabla XVII. Densidad de ruido y límite de corriente de la fuente propuesta.

Densidad de ruido	
(Operación con batería)	
1KHz	$788pA/\sqrt{Hz}$
Transitorio	$\leq 80ms$
Límite de corriente	
Intervalo	10 – 500mA
Precisión	$\pm 5mA$

Capítulo VIII

Conclusiones

El equipo desarrollado en este trabajo de tesis cumple satisfactoriamente con las especificaciones que se presentaron en capítulo VII, sección VII.4. El instrumento desarrollado es confiable, ya que es estable la corriente de salida, y de operación sencilla. Los resultados de las pruebas realizadas en el laboratorio lo demuestran.

La comparación entre los resultados teóricos y experimentales es satisfactoria ya que se obtienen niveles de ruido similares.

El nivel de ruido que se midió en la fuente propuesta mejora el de las dos fuentes comerciales con las que se comparó.

En la aplicación de la fuente propuesta a un dispositivo optoelectrónico, en este caso al BOA-1004, los resultados fueron satisfactorios, como lo muestran tanto la medición de potencia óptica como la medición del espectro óptico.

VIII.1 Aportaciones

La principal aportación fue el desarrollo de una fuente de corriente de bajo ruido, de bajo costo y de fácil reproducción. Si se cumple con las especificaciones de los componentes utilizados en el diseño, se pueden mantener los niveles de bajo ruido.

VIII.2 Trabajo futuro

- Agregar el modo de operación de potencia constante.
- Cambiar los potenciómetros por otros de mayor sensibilidad para elegir más fácilmente la corriente deseada en la salida de la fuente.
- Analizar el circuito final para determinar si es posible implementar la modulación por la terminal positiva del amplificador operacional.
- Incorporar un medidor de corriente a la fuente para obtener la lectura de la corriente de salida.
- Colocar un indicador de batería baja, para asegurar el buen funcionamiento de la fuente de corriente.
- Agregar un cargador de batería, utilizando el principio de la fuente conmutada para aislar la línea de la tierra de la batería.
- Construir una estructura metálica para la batería, el cargador de batería, el medidor de corriente y la fuente de Howland II.
- Seguir realizando pruebas de reproducción, estabilidad y confiabilidad.

Referencias

- Baker, B. (2005). *A Baker's Dozen Real Analog Solutions for Digital Designers*. Elsevier, primera edición. 347 pp.
- Carter y Mancini (2009). *Opamps for everyone*. Elsevier, tercera edición. 615 pp.
- Castro Delgado, M. y Nuñez Perez, F. R. (2008). "notas de curso de Circuitos Electrónicos II, CICESE". "CE2". "DGT-CICESE ET603".
- COVEGA (2010). Amplificador óptico de semiconductor, características:. <http://www.datasheetdir.com/BOA1004+download>, abril 2010.
- HP (2010). Analizador de espectros óptico, características:. http://www.teknetelectronics.com/Search.asp?p_ID=12361&pDo=DETAIL&HP%20-%20Agilent_70004A, abril 2010. HP-Agilent 70004A.
- Ilxlightwave (2010). Fuente de corriente ILX LDX-3620. http://www.ilxlightwave.com/quickquote/laser_diode_current_source_3620.php, abril 2010.
- MAXIM (2010). Amplificador operacional MAX4475-MAX4477, características:. <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX4475-MAX4489.pdf>, abril 2010.
- Noyes (2010). Medidor de potencia óptica, características:. http://www.afltele.com/products/test_inspection/OPM_power_meters/OPM_1.html, abril 2010.
- Ogata, K. (1998). *Ingeniería de control moderna*. Pearson educación, México, tercera edición. 997 pp.
- Ott, H. W. (1988). *Noise reduction techniques in electronic systems*. Wiley, New York, segunda edición. 426 pp.
- Pascoe, B. (1997). Noise considerations in circuits and systems. <http://www.soccentral.com/results.asp?CatID=205&EntryID=3984>, abril 2010.
- Pease, R. A. (2008). A comprehensive study of the howland current pump, application note # 1515.
- Picotech (2010). Picoscopio-3000, características:. <http://www.picotech.com/picoscope3205-review.html>, abril 2010.
- Soderquist, D. (2010). Minimization of noise in operational amplifier applications. <http://www.supplyframe.com/document/app-note?id=1559852&keywords=&manufacturer=national%2Bsemiconductor>, abril 2010. Application note 15.
- Thorlabs (2010). Fuente de corriente LDC-205, características:. <http://www.thorlabs.com/thorProduct.cfm?partNumber=LDC205B>, abril 2010.

Apéndice A

Características y especificaciones de la fuente ILX-lightwave LDX-3620

A continuación se presentan las características y especificaciones de la fuente ILX-lightwave LDX-3620.

A.1 Características de la fuente LDX-3620

La fuente de corriente de ultra bajo ruido LDX-3620 proporciona a los usuarios que utilizan diodos láser una fuente para aplicaciones que requieren estabilidad en la corriente menor a 10 ppm y ruido de niveles bajos como $2\mu A$ en la banda de $5Hz$ a $10MHz$. Sus características incluyen:

- Bajo ruido, basado en diseño con batería.
- Construido con cargador de batería.
- Alta estabilidad de salida.
- Protección de límite de corriente.
- Dos intervalos de corriente: $0 - 200mA$ y $0 - 500mA$.
- Despliegue de $4 - 1/2$ dígitos de resolución.

- Despliegue para la corriente del fotodiodo monitor.
- Retroalimentación de la corriente del fotodiodo monitor para potencia óptica constante.
- Generador de rampa interna con disparador de salida.
- Capacidad para modulación externa.
- Protección contra nivel bajo de batería.
- Interruptor para elección de anchura de banda.

A.2 Especificaciones de la fuente LDX-3620

A continuación se presentan las características proporcionadas en el manual de usuario de la fuente LDX-3620.

Tabla XVIII. Especificaciones de la fuente LDX-3620.

Salida	0-200mA	0-500mA
Corriente de salida:	0 – 200mA	0 – 500mA
Voltaje de cumplimiento:	≥ 5 volts	≥ 4 volts
Ruido y rizo (Anchura de banda 5Hz – 10MHz)		
Operación con batería	$\leq 850nA$ eficaz	$\leq 2\mu A$ eficaz
Operación con corriente alterna	$\leq 3\mu A$ eficaz	$\leq 8\mu A$ eficaz
(Anchura de banda 5Hz – 10KHz)		
Operación con batería	$\leq 100nA$ eficaz	$\leq 500nA$ eficaz
Operación con corriente alterna	$\leq 2\mu A$ eficaz	$\leq 6.5\mu A$ eficaz
Densidad de ruido (Operación con batería)		
50/60Hz	$5.2nA/\sqrt{Hz}$	$11.5nA/\sqrt{Hz}$
1KHz	$850pA/\sqrt{Hz}$	$2.6nA/\sqrt{Hz}$
25KHz	$315pA/\sqrt{Hz}$	$795pA/\sqrt{Hz}$

Tabla XIX. Estabilidad de la fuente LDX-3620.

Estabilidad	
10 – 20 segundos	$\leq 0.01ppm$
3 – 5 min	$\leq 1ppm$
10 – 30 min	$\leq 10ppm$
Coefficiente de temperatura	$\leq 10ppm/^{\circ}C$
Transitorio	$\leq 1\mu A$

Tabla XX. Límite de corriente de la fuente LDX-3620.

Límite de corriente	
Intervalo	10 – 500mA
Precisión	$\pm 5mA$

Tabla XXI. Despliegue de la fuente LDX-3620.

Despliegue		
Tipo	4 – 1/2 dígitos LCD	
	0-200mA	0-500mA
Resolución	0.01mA	0.1mA
Exactitud	$\pm 0.05mA$	$\pm 0.6mA$

Apéndice B

Programa de Matlab utilizado para calcular la sensibilidad

```
%% Inicio

clc

clear all

close all

%clear all

%% SENSIBILIDAD DE R1%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

vi=0:.1:2;

for c=1:length(vi);

    R1=1000;    Rx=4;    DR1 = 10;

    z1=0.025.*Rx./vi(c);

    Di_L1 = (z1.*vi(c).* DR1 - vi(c).*DR1.*Rx)./(2.*R1.*Rx^2);

    figure (1)

    plot(vi(c),Di_L1,'o')

    grid on

    xlabel 'v_i'

    ylabel '\Delta i_L'

    title 'Sensibilidad R1'
```

```

        hold on
    end

%% SENSIBILIDAD DE R2%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
vi=0:.1:2;
for c=1:length(vi);
    R2=1000;    Rx=4;    DR2 = 10;

    z1=0.025.*Rx./vi(c);

    Di_L2 = (-z1.*vi(c).* DR2 + vi(c).*DR2.*Rx)./(2.*R2.*Rx^2);

    figure (2)
    plot(vi(c),Di_L2,'*' )
    grid on
    xlabel 'v_i'
    ylabel '\Delta i_L'
    title 'Sensibilidad R2'

    hold on
end

%% SENSIBILIDAD DE R3%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
vi=0:.1:2;
for c=1:length(vi);
    R3=1000;    Rx=4;    DR3 = 10;

    z1=0.025.*Rx./vi(c);

    Di_L3 = (z1.*vi(c).* DR3 + vi(c).*DR3.*Rx)./(2.*R3.*Rx^2);

    figure (3)
    plot(vi(c),Di_L3,'o' )
    grid on

```

```

    xlabel 'v_i'
    ylabel '\Delta i_L'
    title 'Sensibilidad R3'

    hold on
end

%% SENSIBILIDAD DE R4%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

vi=0:.1:2;

for c=1:length(vi);

    R4=1000;    Rx=4;    DR4 = 10;

    z1=0.025.*Rx./vi(c);

    Di_L4 = (-z1.*vi(c).* DR4 - vi(c).*DR4.*Rx)./(2.*R4.*Rx^2);

    figure (4)

    plot(vi(c),Di_L4,'*' )

    grid on

    xlabel 'v_i'

    ylabel '\Delta i_L'

    title 'Sensibilidad R4'

    hold on

end

%% SENSIBILIDAD DE Rx

vi=0:.1:2;

for c=1:length(vi);

    Rx=4;    DRx = .04;

    Di_Lx = (vi(c)* DRx)/(Rx^2);

    figure (5)

```

```

plot(vi(c),Di_Lx,'o')
grid on
xlabel 'v_i'
ylabel '\Delta i_L'
title 'Sensibilidad Rx'
hold on
end

%% SENSIBILIDAD DE R1 con delta R1=0 %%%%%%%%%%%%%%%
vi=0:.1:2;
for c=1:length(vi);
    R1=1000;    Rx=4;  DR1 = 0;
    z1=0.025.*Rx./vi(c);
    Di_L1 = (z1.*vi(c).* DR1 - vi(c).*DR1.*Rx)./(2.*R1.*Rx^2);
    figure (6)
    plot(vi(c),Di_L1,'o')
    grid on
    xlabel 'v_i'
    ylabel '\Delta i_L'
    title 'Sensibilidad R1 cuando \Delta R1=0'
    hold on
end

```