

Jerarquía en Expresiones de Ruido para Amplificadores con Uno y Dos Lazos de Retroalimentación Basados en Nullor

Roberto Castañeda Sheissa
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica
Departamento de Electrónica, Grupo de CAD
P.O. Box 51, 72000, Puebla, Pue., México
Email: rsheissa@inaoep.mx

RESUMEN

El presente trabajo muestra la jerarquía existente en las expresiones de ruido equivalente a la entrada para amplificadores cuyo diseño se basa en nullor. Las expresiones presentadas son para amplificadores de un lazo y dos lazos de retroalimentación. Tales expresiones pueden ser codificadas mediante un lenguaje de programación a fin de incluirlas en una herramienta de diseño automatizado.

I. INTRODUCCIÓN

La teoría de diseño estructurado [1], [2] permite realizar diseño partiendo del principio que existe una *solución ideal*. A partir de esta solución ideal se realiza la síntesis necesaria para llegar a un resultado particular, en otras palabras, el resultado final es un circuito con elementos reales. Gráficamente se puede visualizar el concepto en la figura 1.

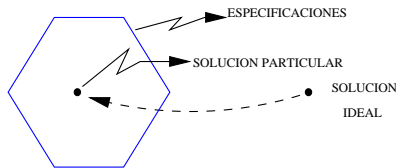


Fig. 1. Diseño Estructurado

II. EL NULLOR

Para el diseño de amplificadores, el diseño estructurado utiliza el concepto de nullor como el elemento para alcanzar la solución ideal. Este elemento es un componente singular de dos puertos. En el puerto de entrada se encuentra un nullator y en el puerto de salida un norator, como se muestra en la figura 2.

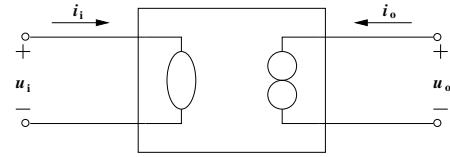


Fig. 2. El Nullor

A la entrada, el *nullator* tiene una relación de rama que vuelve cero la corriente y el voltaje, esto es

$$i_i = 0 \quad u_i = 0$$

Para el puerto de salida, el *norator* tiene una relación de rama que permite a ambas variables, voltaje y corriente, tomar cualquier valor, es decir

$$i_o = \times \quad u_o = \times$$

por lo tanto, las variables de salida del *nullor* están definidas por el ambiente.

Una propiedad interesante del nullor que es sumamente útil en el diseño de amplificadores es que su *matriz de la cadena* tiene la forma:

$$K = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

esto significa que el *nullor* representa todos los tipos de funciones de transferencia teniendo ganancia muy alta, ninguna contribución de ruido y comportamiento que no depende de la frecuencia.

Como resultado, el diseño estructurado de amplificadores consiste en una modificación sistemática del nullor hasta realizar su completa síntesis con dispositivos reales, tales como son los transistores.

Es posible ver a un amplificador con retroalimentación negativa como la conexión de dos

bloques; el primer bloque se considera la planta a ser controlada y el segundo bloque es la *retroalimentación* del sistema. La planta es el *nullor* el cual será sintetizado utilizando dispositivos con ganancia alta, los únicos dispositivos que poseen esta característica son los dispositivos activos. La red de retroalimentación está formada por redes pasivas conteniendo resistores.

III. DISEÑO ESTRUCTURADO

Se han definido topologías básicas de amplificadores con un lazo de retroalimentación mediante la combinación del *nullor* y componentes pasivos [1], [3], las cuales se presentan en la figura 3.

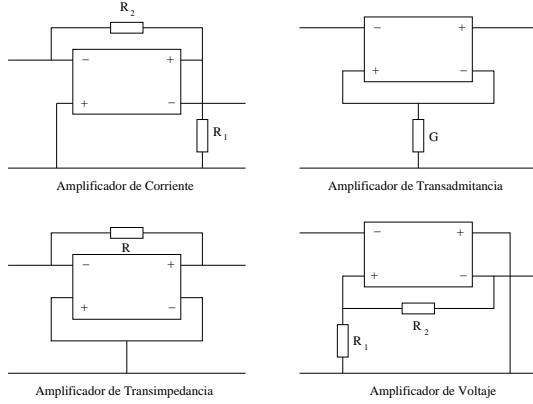


Fig. 3. Topologías Básicas de Un Lazo.

La figura 4 muestra la topología con dos lazos de retroalimentación [3]. Las matrices de transmisión para las topologías básicas de un lazo son las siguientes:

$$\begin{aligned} K_V &= \begin{bmatrix} \frac{1}{1+R_1/R_2} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & K_G &= \begin{bmatrix} 0 & -1/G \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ K_R &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1/R & 0 \end{bmatrix} & K_I &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{1+R_1/R_2} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

Las *matrices de transmisión* para cada una de las topologías de dos lazos son las siguientes:

$$\begin{aligned} K_{(A)} &= \begin{bmatrix} \frac{R_1+R_2}{R_2} & 0 \\ \frac{(R_1+R_2)(R_3+R_4)}{R_2+R_3} & \frac{R_3+R_4}{R_4} \end{bmatrix} \\ K_{(B)} &= \begin{bmatrix} 1 - G_2 R_1 & \frac{1-G_2 R_1}{R_1} \\ \frac{1-G_2 R_1}{G_2} & 1 - G_2 R_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

Las configuraciones de dos lazos son empleadas como acopladores de impedancias en entrada o salida [4].

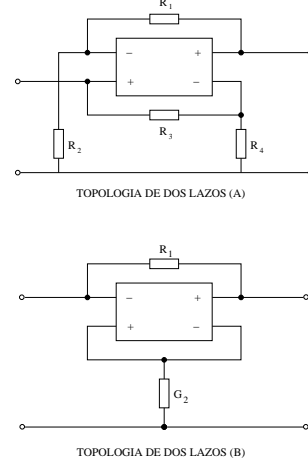


Fig. 4. Topologías Básicas de Dos Lazos con Nullor.

A. RUIDO EN AMPLIFICADORES

El ruido es un fenómeno que inevitablemente se encuentra en cualquier diseño electrónico no importando la configuración ni los componentes. Aunque no es posible eliminarlo definitivamente es posible mantenerlo dentro de ciertos límites, propuestos por el diseñador, siendo necesario conocer las contribuciones de todos los componentes del amplificador.

El mejor punto para medir el valor de ruido total es a la salida del amplificador, esto es lo que comúnmente se realiza para obtener el valor modificado con respecto a la señal de entrada. Desde el punto de vista del diseño de amplificadores el punto más conveniente para realizar la medición de la contribución de ruido es a la entrada del amplificador. Utilizando este concepto se puede obtener un valor de ruido representado por una fuente de voltaje, corriente o ambas. Esta o estas fuentes estarán fuera de la implementación del amplificador, es decir, se tiene un amplificador libre de ruido.

Para obtener la contribución de ruido de todos los elementos utilizados en la síntesis e implementación del amplificador, es necesario mover las fuentes ruidosas hacia el exterior. Esto se realiza por medio de varias manipulaciones de fuentes [1], [4].

IV. JERARQUÍA DE EXPRESIONES

Para las topologías de un solo lazo se obtiene una sola expresión para cada una de ellas; para las topologías de doble lazo se obtienen dos expresiones debido a que estas configuraciones pueden ser excitadas tanto por fuentes de corriente o de voltaje y obtener corriente o voltaje

$$u_{n,v_{total}} = u_{ns} + u_{nn} + \left(R_s + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}\right) i_{nn} + \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) u_{nR_1} + \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) u_{nR_2} \quad (4)$$

$$u_{n,v_{total}} = u_{ns} + u_{nn} + (R_s + R) i_{nn} + (R) i_{nR} \quad (5)$$

$$i_{n,i_{total}} = i_{ns} + i_{nn} + \left(\frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_1 + R_2}\right) u_{nn} + \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) i_{nR_2} + \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) i_{nR_1} \quad (6)$$

$$i_{n,i_{total}} = i_{ns} + i_{nn} + \left(\frac{1}{R_s} + \frac{1}{R}\right) u_{nn} + \left(\frac{1}{R}\right) u_{nR} \quad (7)$$

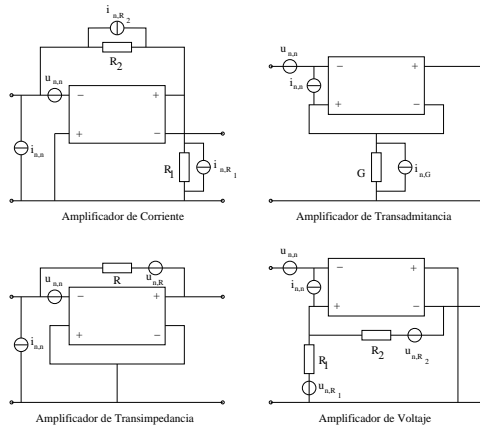


Fig. 5. Amplificador Un Lazo con Ruido

a la salida.

A. Expresiones para Un Lazo

Las expresiones a obtener de los amplificadores mostrados en la figura 5 se clasifican dependiendo del tipo de fuente de excitación dando como resultado las siguientes ecuaciones de ruido: para el amplificador de voltaje (4), transconductancia (5), transimpedancia (6) y corriente (7).

B. Expresiones para Dos Lazos

Las topologías se muestran en la figura 6, tomando en cuenta la nomenclatura mostrada en la figura se hará referencia a los amplificadores como (A) y (B) respectivamente. Las expresiones de ruido para (A) son (8) y (9), para (B) (10) y (11).

C. Relación de Jerarquía

Desde el punto de vista de diseño estructurado se ha partido desde el elemento ideal,

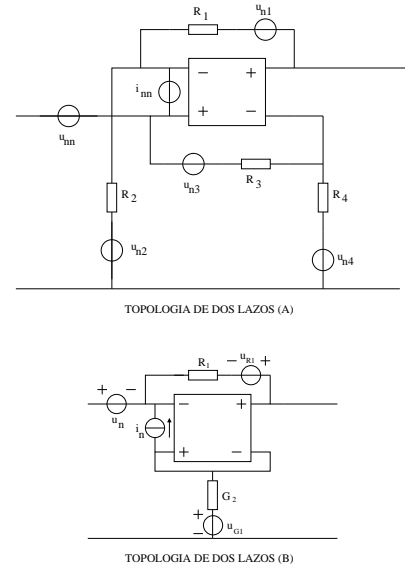


Fig. 6. Amplificador Dos Lazos con Ruido

se agregó una red de retroalimentación y se anexó una excitación. Sobre el arreglo anterior se realizaron los cálculos para obtener el equivalente de ruido a la entrada tomando en cuenta todos los elementos que forman parte del circuito. En resumen se han recorrido los distintos niveles de jerarquía para el diseño de esta etapa del amplificador.

Al observar las expresiones obtenidas para uno y dos lazos de retroalimentación es posible notar las relaciones que entre ellas existen si se agrupan de tal forma que se puedan formar bloques. Agrupando los resultados en estos bloques es posible notar lo siguiente:

■ **Ruido de la Fuente.** Esta contribución es del mismo tipo de la variable de entrada del amplificador. Este dato es definido comúnmente por la característica de la resistencia de fuente,

$$u_{n,v_{total}(A)} = u_{ns} + u_{nn} + \left(R_S + R_2 + \frac{R_S R_2}{R_3 + R_4}\right) i_{nn} + \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_S(R_3 + R_4)}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}\right) u_{nR_1} + \left(1 + \frac{R_S}{R_3 + R_4}\right) u_{nR_2} + \left(\frac{R_S}{R_3 + R_4}\right) u_{nR_3} + \left(\frac{R_S}{R_3 + R_4}\right) u_{nR_4} \quad (8)$$

$$i_{n,i_{total}(A)} = i_{ns} + i_{nn} + \left(G_S + \frac{1}{R_3 + R_4}\right) u_{nn} + \left(\frac{R_1 R_2 G_S}{R_1 + R_2} + \frac{R_1 R_2 + R_1 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}\right) i_{nR_1} + \left(R_2 G_S + \frac{R_2}{R_3 + R_4}\right) i_{nR_2} + \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4}\right) i_{nR_3} + \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) i_{nR_4} \quad (9)$$

$$u_{n,v_{total}(B)} = u_{ns} + u_{nn} + \left(R_S + \frac{R_S + R}{1 - GR}\right) i_{nn} + \left(\frac{1 + GR_S}{1 - GR}\right) u_{nR} + \left(\frac{G(R + R_S)}{1 - GR}\right) u_{nG} \quad (10)$$

$$i_{n,i_{total}(B)} = i_{ns} + i_{nn} + \left(G_S + \frac{G_S + G}{1 - GR}\right) u_{nn} + \left(\frac{R(G_S + G)}{1 - GR}\right) i_{nR} + \left(\frac{1 + G_S R}{1 - GR}\right) i_{nG} \quad (11)$$

y por lo tanto es un valor que no puede ser modificado. Se denota como u_{ns} ó i_{ns} .

■ **Ruido del nullor con la variable apropiada.** Este es el ruido de la síntesis del nullor expresado en el mismo valor que el ruido de la fuente. Puede ser u_{nn} ó i_{nn} . u_{nn} está conectada en serie e i_{nn} en paralelo.

■ **Ruido del nullor de la variable disjunta.** La contribución de ruido por la síntesis del nullor expresada como la ley de Ohm:

$$u = (R_S + R_{eq}) i_{nn}$$

ó

$$i = (G_S + G_{eq}) u_{nn}$$

donde R_S es la resistencia de fuente y $G_S = 1/R_S$. Donde la contribución de R_{eq} depende de los resistores con que se implementa la red de retroalimentación.

■ **Ruido por la red pasiva.** Esta es la contribución de ruido por los resistores que conforman la red de retroalimentación. Para los amplificadores de voltaje y corriente de un solo lazo y el amplificador de dos lazos (B) involucran a dos resistores, para el amplificador de dos lazos (A) involucra a cuatro resistores; esto significan contribuciones significativas al ruido total del amplificador. Para el resto de los amplificadores, la ganancia está determinada por un solo resistor, por lo tanto un único termino aparece en la suma.

Es conveniente recalcar que el nullor es un dispositivo ideal y por lo tanto no contribuye de ninguna manera al ruido total; sin embargo las fuentes que se colocan a la entrada del nullor son las contribuciones de ruido relacionadas con la síntesis del nullor.

V. CONCLUSIONES

Se han presentado las expresiones de ruido equivalente a la entrada para amplificadores de retralimentación negativa de uno y dos lazos. Se ha explicado la jerarquía resultante. Tales expresiones permiten automatizar el diseño de amplificadores en lo concerniente al comportamiento contra ruido.

VI. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al CONACYT el apoyo otorgado através de la beca de estudios de Doctorado número 118652/120341, la cual sin ella no hubiera sido posible realizar esta labor de investigación tan importante. También deseo agradecer el apoyo de los Doctores Arturo Sarmiento Reyes y Luis Hernández Martínez por la dirección y atención prestada para la realización del presente trabajo.

VII. REFERENCIAS

- [1] C.J.M. Verhoeven, A. van Staveren, G.L.E. Monna, and M.H.L. Kouwenhoven, *Strutured Electronic Design, Negative-feedback Amplifiers*, Delftse Uitgevers Maatschappij, 2001.
- [2] C.J.M. Verhoeven and A. van Staveren, "Systematic biasing of negative-feedback amplifiers," in *Proceedings of the Design Automation and Test in Europe Conference*. DATE'1999, 1996, pp. 318-322.
- [3] J. Stoffels, *Automation in High-Performance Negative Feedback Amplifier Design*, Ph.D. thesis, Delft University of Technology, 1988.
- [4] E.H. Nordholt, *Design of High Performance Negative-feedback amplifiers*, Elsevier Scientific, 1983.