

DISEÑO DE CIRCUITOS ELECTRONICOS BASADO EN REGLAS

Javier Cañas R. Ernesto Lux G.
Departamento de Informática
Universidad Técnica Federico Santa María

Resumen

Este trabajo describe un método de diseño de circuitos electrónicos basado en reglas, es decir, en especificaciones formales. Este método permite dos cosas importantes en el diseño de un circuito electrónico: simplificar su ciclo de vida facilitando las etapas de especificación, diseño y mantención. También permite su optimización al encontrar un espacio de soluciones que satisfacen los requerimientos.

La utilización práctica del método requiere sólo disponer de un lenguaje de programación basado en reglas tal como PROLOG u OPS5.

Se desarrolla un ejemplo práctico de diseño de un amplificador clase A con un transistor, en el cual dadas ciertas restricciones, se obtiene un espacio de soluciones completo.

1.- Introducción

Es tradicional en diversos campos de la ingeniería la siguiente afirmación: "el análisis es una técnica y el diseño un arte". Al profundizar en esto, nos damos cuenta que no es precisamente el arte lo que diferencia al análisis del diseño, sino más bien, una relación de complejidad.

Diseñar significa explorar múltiples, infinitas soluciones. Como en la práctica esto resulta imposible, es finalmente el criterio y la agudeza del ingeniero lo que determina la calidad de la solución.

Pero el diseño de circuitos electrónicos ¿tiene infinitas soluciones?. Si se asume que los componentes físicos que intervienen en un circuito electrónico están normalizados y sus valores son discretos, se logra un concepto distinto de diseño.

El diseño, desde esta perspectiva, se transforma en la obtención de un espacio de soluciones mediante un proceso combinatorio, el cual tiene que satisfacer las restricciones circuitales dadas para un diseño en particular. Utilizando técnicas de especificación formales de restricciones y ecuaciones circuitales, es posible obtener los espacios de soluciones buscados.

2.- El contexto del método

Un circuito electrónico, siempre se ubica en un contexto más amplio, es decir, un circuito es siempre un subsistema o un bloque de un sistema mayor.

Esto significa que estos sistemas están siempre jerarquizados y son factibles de descomponer en múltiples niveles.

Para ubicar el método en un contexto más general, se verá brevemente el ciclo de vida completo de un sistema electrónico.

El ciclo de vida de un sistema electrónico se compone de las siguientes etapas:

- a) Análisis: Involucra entender el contexto del sistema.
- b) Especificación: Involucra la especificación del sistema por sus características externas.
- c) Diseño: En esta etapa se obtiene la topología y valores de componentes.
- d) Construcción: Armado de un prototipo.
- e) Prueba: Verificación del prototipo en laboratorio.

f) Validación: Revisión de las etapas anteriores verificando si al interconectar se cumplen las expectativas del análisis.

g) Mantenición: Modificaciones posteriores al diseño.

El método propuesto permite facilitar las etapas de especificación, diseño y mantención.

Al formalizar las especificaciones, es posible lograr una mejor comprensión del problema, como también verificar que éstas sean consistentes.

Al tener especificaciones formales se automatiza el proceso de diseño.

La etapa de mantención también se simplifica ya que la especificación formal en sí constituye una documentación detallada del sistema electrónico.

3.- Restricciones

El método que se presenta contempla las siguientes restricciones:

i) Topología fija: El proceso de diseño consistirá sólo en obtener valores de componentes. Esto puede aparecer como una severa restricción, pero sólo significa trasladar el proceso de diseño a un ámbito particular ya que las topologías son también finitas. Para ejemplificar lo anterior considérese el caso de un amplificador con un transistor: existen diversas topologías pero cada una de ellas tiene características particulares de ganancia, impedancia y ancho de banda.

ii) Componentes de valores discretos: Los resistores, condensadores e inductores están discretizados según rangos de precisión y criterios de fabricación.

En el caso de fuentes de voltaje esto no parece ser así, pero en la práctica estos valores también son discretos, por ejemplo fuentes de 5, 10, 12, 15,... volts.

iii) Condiciones de borde formales: Las restricciones de diseño deben ser factibles de ser expresadas en forma matemática o lógica.

4.- El ambiente de diseño

El ambiente de diseño de un circuito electrónico lo forma:

- a) Las leyes físicas que rigen su comportamiento (Leyes de Kirchhoff).
- b) Las relaciones terminales de los elementos.
- c) El conjunto de componentes (resistencias, condensadores, etc.) estandarizados.
- d) Los puntos a, b, c constituyen la base del conocimiento, y el punto d representa la especificación del circuito. Estos puntos determinan en definitiva el diseño del circuito electrónico, como se puede apreciar en la figura 1.

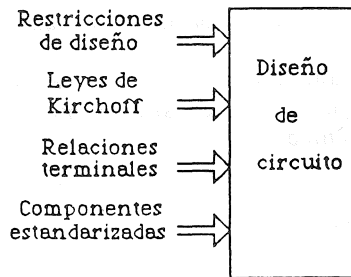


Figura 1

5.- Modelamiento lógico de un circuito

Tanto la base de conocimientos como las especificaciones de diseño se pueden especificar en forma lógica. Considérese a modo de ejemplo el circuito mostrado en la figura 2.

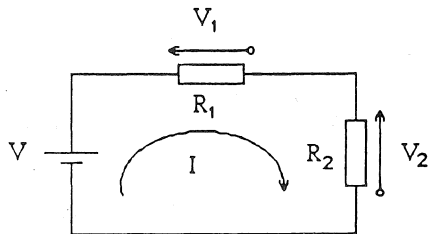


Figura 2

El conocimiento de este circuito está constituido por:

a) Leyes físicas:

$$V = V_1 + V_2$$

b) Las relaciones terminales:

$$V_1 = I * R_1$$

$$V_2 = I * R_2$$

c) El conjunto de componentes estandarizados:

$$Q = \{ r_i \mid r_i \text{ es resistencia de valor normalizado} \}$$
$$R_1, R_2 \in Q$$

El conocimiento se puede expresar mediante sentencias lógicas:

$$C_1 : V = V_1 + V_2$$

$$C_2 : V_1 = I * R_1$$

$$C_3 : V_2 = I * R_2$$

$$C_4 : R_1 \in Q$$

$$C_5 : R_2 \in Q$$

$$\text{Suponiendo que } P = C_1 \wedge C_2 \wedge C_3 \wedge C_4 \wedge C_5 :$$

entonces cualquier combinación de V , V_1 , V_2 , I , R_1 y R_2 que satisfaga P es una instancia válida y por lo tanto una solución del circuito.

6.- Diseño basado en reglas

$$\text{Sea : } P = \bigwedge_i^n C_i \quad \text{donde } C_i \text{ es la sentencia } i \text{ de la base de conocimiento.}$$

$$R = \bigwedge_i^m R_i \quad \text{donde } R \text{ es la restricción } i.$$

El espacio de soluciones de un diseño se expresa por:

$$S = P \wedge R$$

O sea, es el conjunto de valores que satisfacen S

7.- Un experimento

Las ideas anteriores se ejemplifican en un diseño concreto: un amplificador clase, A de un transistor, polarizado con una fuente de 12 V. Las condiciones de borde están dadas por una resistencia de carga $0.5\text{ K}\Omega$ y la fuente de señal tiene una resistencia interna de $0.6\text{ K}\Omega$. Se elige un transistor de silicio con β mínimo de 100.

Se requiere de una ganancia de voltaje mínima de 32 y un swing de voltaje mínimo en la resistencia de carga de 2 volts peak.

La topología del circuito es la mostrada en la figura 3.

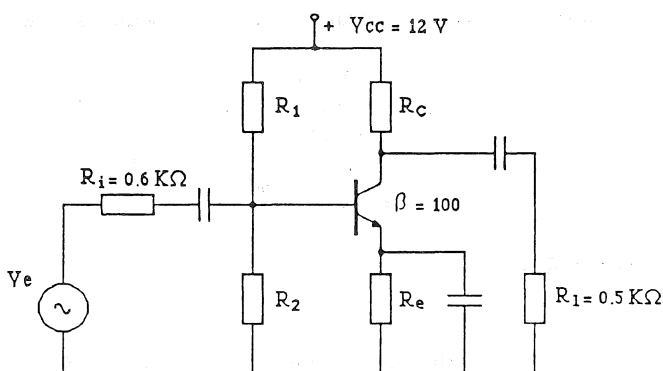


Figura 3

La base de conocimiento de este circuito lo constituyen las siguientes ecuaciones:

- [1] $V_{bb} = V_{cc} * R_2 / (R_1 + R_2)$
(Debe cumplir con $V_{bb} > 0.7\text{ V}$)
- [2] $R_b = R_1 * R_2 / (R_1 + R_2)$
- [3] $I_{cq} = (V_{bb} - 0.7) / (R_e + R_b / \beta)$
- [4] $R_e > 10 * R_b / \beta$
- [5] $H_{ic} = \beta * V_T / I_{cq}$
- [6] $V_{ceq} = V_{cc} - I_{cq} * (R_c + R_e)$
(Debe cumplir con $V_{ceq} > 0.2\text{ V}$)
- [7] $\text{swing} = \min(V_{ceq}, I_{cq} * R_{ac})$
- [8] $A_v = \beta * (R_b \parallel H_{ic}) * (R_c \parallel R_L) / ((R_i + (R_b \parallel H_{ic})) * H_{ic})$

Estas ecuaciones representan:

- [1] Voltaje de base del transistor.
- [2] Resistencia de base.
- [3] Corriente de polarización de colector.
- [4] Criterio de estabilidad de la red de polarización.
- [5] Resistencia dinámica de entrada en el punto de polarización.
VT es una constante (25 mV @ 25 °C).
- [6] Voltaje colector-emisor en el punto de operación.
- [7] Swing de voltaje de peak en la carga. $R_{ac} = R_c \parallel R_L$.
- [8] Ganancia de voltaje.

Las restricciones de diseño son:

- [a] $A_V > 32$
- [b] $\text{swing} > 2.0 \text{ V peak}$

De acuerdo al planteamiento original, el proceso de diseño significa explorar combinaciones válidas (resistencias normalizadas) de R_c , R_e , R_1 y R_2 que satisfagan las 8 ecuaciones y las dos restricciones anteriores.

De una manera más formal lo anterior se puede expresar en un programa PROLOG:

/* DISEÑO AMPLIFICADOR CLASE A

Por simplicidad se omite en este programa el código correspondiente al formato de salida de resultados. El predicado principal se denomina "diseño"

*/

paralelo(R_p , R_a , R_b) :-

/* calcula $R_p = R_a \parallel R_b$ */

R_p is $R_a * R_b / (R_a + R_b)$.

fuentes_base(V_{bb} , V_{cc} , R_1 , R_2) :-

/* ecuación [1] */

V_{bb} is $V_{cc} * R_2 / (R_1 + R_2)$,

$V_{bb} > 0.7$.

estabilidad(R_b , R_e , Beta) :-

/* ecuación [4] */

$R_e > 10 * R_b / \text{Beta}$.

i_{colector} (I_{cq} , V_{bb} , R_b , R_e , Beta) :-

/* ecuación [3] */

I_{cq} is $(V_{bb} - 0.7) / (R_e + R_b / \text{Beta})$.

hie(Hie, I_{cq} , Beta) :- /* ecuación [5] */
Hie is $\text{Beta} * 2.5e-2 / I_{cq}$.

vceq(V_{ceq} , V_{cc} , I_{cq} , R_c , R_1) :- /* ecuación [6] */
 V_{ceq} is $V_{cc} - I_{cq} * (R_c + R_e)$,
 $V_{ceq} > 0.2$.

swing(V_1 , V_{ceq} , I_{cq} , R_c , R_1) :- /* ecuación [7] */
paralelo(R_{ac} , R_c , R_1),
 $V_{ceq} > I_{cq} * R_{ac}$,
 V_1 is $I_{cq} * R_{ac} \mid V_1$ is V_{ceq} .

ganancia(A_v , R_c , R_b , R_i , R_L , Hie, Beta) :- /* ecuación [8] */
paralelo(R_{in} , R_b , Hie),
paralelo(R_{out} , R_c , R_L),
 A_v is $\text{Beta} * R_{out} * R_{in} / ((R_i + R_{in}) * \text{Hie})$.

/* BASE DE DATOS RESISTENCIAS

Esta base de datos corresponde a resistencias con 10% de tolerancia. Por simplicidad se muestra sólo una parte de esta base de datos.

Es conveniente mantener estos datos en un archivo aparte.

Los valores están expresados en $K\Omega$. */

resistor(10.0e-2).	resistor(15.0).
resistor(12.0e-2).	resistor(18.0).
resistor(15.0e-2).	resistor(22.0).
resistor(18.0e-2).	resistor(2.7e1).

.....

/* esta es la regla principal */

diseño(A_v , Swing, V_{cc} , Beta, R_c , R_e , R_1 , R_2 , R_i , R_L) :-

resistor(R_1),

resistor(R_2),

paralelo(R_b , R_1 , R_2),

fuentes_base(V_{bb} , V_{cc} , R_1 , R_2),

resistor(R_c),

estabilidad(R_b , R_e , Beta),

$i_{colector}(I_{cq}$, V_{bb} , R_b , R_c , Beta),

resistor(R_c),

vceq(V_{ceq} , V_{cc} , I_{cq} , R_c , R_e),

swing(V_1 , V_{ceq} , I_{cq} , R_c , R_e),

$V_1 >= \text{Swing}$,

hie(H_{ie} , I_{cq} , β),
ganancia(G , R_c , R_b , R_i , R_L , H_{ie} , β),
 $G > A_v$.

El espacio de soluciones obtenido después de ejecutar este programa es:

Diseño para $R_i=0.6K$, $R_L=0.5K$, $A_v > 32$, swing > 2.0 , $V_{cc}=12V$, $\beta=100$

A_v	Swing	R_c	R_e	R_1	R_2
32.03	2.23	0.68	0.18	6.80	2.20
32.34	2.18	0.82	0.22	6.80	2.20
32.15	2.10	1.00	0.27	6.80	2.20
32.32	2.68	0.82	0.18	8.20	2.20
32.23	2.55	1.00	0.22	8.20	2.20
32.96	2.17	0.82	0.22	8.20	2.70
32.88	2.06	1.00	0.27	8.20	2.70
32.11	2.07	1.20	0.33	8.20	2.70
32.75	2.64	1.00	0.22	10.00	2.70
33.27	2.19	1.00	0.27	10.00	3.30
32.57	2.18	1.20	0.33	10.00	3.30
33.09	2.09	1.00	0.33	10.00	3.90
32.95	2.03	0.82	0.33	10.00	4.70
32.60	2.62	1.20	0.27	12.00	3.30
32.61	2.45	1.20	0.33	12.00	3.90
32.00	2.12	1.50	0.47	15.00	5.60
32.71	2.17	1.20	0.47	15.00	6.80

8.- Comentarios

Si bien el ejemplo presentado es un circuito relativamente simple, se ha seleccionado ya que contiene varios compromisos de diseño que son difíciles de satisfacer. Por ejemplo, la ganancia (ecuación [8]) depende del valor de H_{ie} (ecuación [5]) que a su vez depende de I_{cq} (ecuación [3]). También el swing (ecuación [7]) depende de los valores de I_{cq} y de R_c .

Normalmente al diseñar en forma manual se recurre a algunas simplificaciones, como por ejemplo, el darse en forma arbitraria algunos valores de resistencias. Otra simplificación usada es descomponer la expresión de ganancia en factores iguales [3].

En el diseño manual los componentes se normalizan una vez que se ha calculado su valor. Esto significa sucesivas iteraciones del proceso de diseño para intentar cumplir las especificaciones.

El programa señalado es completamente general siendo su única restricción la topología del circuito. El programa PROLOG permite experimentar diversas combinaciones de parámetros tales como: fuentes de polarización, valores de β , resistencias, etc.

Fue desarrollado en Quintus Prolog en una máquina Vax Station 2000 bajo el sistema operativo Ultrics.

El tiempo de ejecución para obtener el espacio de soluciones completo, es decir, las cuatro resistencias de incógnita es de 110 minutos aproximadamente, en un programa compilado.

9.- Conclusiones

El diseño de sistemas de ingeniería sometido a múltiples compromisos y restricciones, se puede encarar desde este nuevo enfoque, el cual al estar basado en reglas, traslada la concepción analítica tradicional en lógica que convierte lo algorítmico en declarativo.

El método resulta especialmente atractivo en el diseño de circuitos electrónicos. Un uso importante es en la docencia de ingeniería electrónica debido que al expresar un circuito en reglas, se obtiene una mejor comprensión de él y también una excelente documentación. El programa de diseño son sólo las ecuaciones que describen el circuito expresadas en PROLOG. Otro uso atractivo es la optimización. Al generarse un espacio de soluciones es posible optimizar en forma visual o añadir mayores restricciones.

Un punto débil es la complejidad temporal del programa, lo que establece automáticamente una cota en cuanto a la complejidad circuital. Frente a este hecho hay dos reflexiones: se puede introducir un predicado de optimización que mediante alguna heurística reduzca el espacio de búsqueda, y lo otro es que también siempre es posible descomponer un circuito en sub-circuitos y realizar optimizaciones locales.

Referencias

- 1) P. Horowitz, W. Hill: "The Art of Electronics", 2 edición, Cambridge University Press, 1989.
- 2) G. Robison: "An Introduction to Mathematical Logic", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1969.

- 3) D. Schilling, C. Belove: "Electronic Circuits: Discreted and Integrated", McGraw-Hill, New York 1968.
- 4) Quintus Computer Systems, Inc.: "Quintus Prolog Reference Manual", 1986.
- 5) Clocksin & Mellish: "Programming in PROLOG", Springer Verlag, NY, EEUU, 1984.
- 6) Hayes, F. "Rule-base system", Communications of the ACM, 28:9 (Sept. 1985).