

# Síntesis Automática de Celdas Analógicas utilizando nuevas estrategias "Búsqueda Tabú"

M.A.Aguirre, M. Caballero, A.Torralba y L.G.Franquelo  
Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática. Escuela Superior de Ingenieros

Avda. Reina Mercedes s/n, Sevilla-41012 (SPAIN)  
e-mail: aguirre@gte.esi.us.es

## 1 Introducción

El diseño de celdas analógicas con unas determinadas especificaciones es un proceso que todavía no está suficientemente automatizado [1]. La gran complejidad que resulta al dimensionar los elementos que conforman una determinada celda hacen que no existan herramientas de ayuda suficientemente avanzadas que permitan a un diseñador con poca experiencia abordar un diseño analógico o mixto [2].

El problema ha de resolverse en dos etapas: La primera es la de la selección de la topología de la celda, y la segunda, la de dimensionar los elementos constitutivos de la misma [4]. Tanto el primero como el segundo problema pueden ser resueltos computacionales.

En particular, el segundo es susceptible de ser automatizado mediante una formulación como un problema de optimización no lineal multivariable y en el espacio continuo con restricciones basadas en los condicionantes tecnológicos. La función objetivo que representa la celda tiene unas propiedades cada vez menos conocidas a medida que se introduce una formulación más exhaustiva de la misma. Estos modelos pueden ser sencillos como en el caso de la linealización de los modelos de los dispositivos en torno a un punto de trabajo o extremadamente complejos, como en el caso de un modelo SPICE de los transistores. Por ello se hace aconsejable el uso de técnicas de búsqueda aleatoria que generen una solución con garantías [5].

Un modelo complejo basado en simulaciones utiliza un tiempo de computación grande por ello se ha llegado a un compromiso entre la confianza en el óptimo encontrado frente a la potencia del algoritmo de búsqueda. Por ello las técnicas basadas en SA resultan del todo inviables, en este caso. Se propone utilizar una heurística de búsqueda

basado en lo que se conoce como *búsqueda tabú* (Tabu Search, TS), también proveniente de la búsqueda aleatoria en espacios discreto, y que es capaz de encontrar soluciones de calidad con un número de muestras muy inferior al que precisa SA.

## 2 Búsqueda Tabu

Este algoritmo fue propuesto por Glover en 1977 [6]-[7] como una técnica de resolución de problemas combinatorios. Se ha aplicado a diferentes problemas tales como programación entera, escalado o coloreado de grafos. También se ha aplicado a problemas de *Layout* VLSI [8].

### 2.1 Forma esquemática del algoritmo

El algoritmo búsqueda tabú es básicamente una búsqueda aleatoria puramente gradencial en la que se previene de explorar en soluciones previamente visitadas. De hecho existen los puntos del espacio visitados son incluidos en una lista FIFO llamada "lista tabú" en la que se incluyen los puntos a medida que se recorre el espacio. La misión de la lista es doble: por un lado previene de visitar el mismo punto cíclicamente, y por otro, de salir de mínimos locales. Al algoritmo se le añaden nuevas reglas que le dotan de cierta flexibilidad a la tomar ciertas decisiones acerca de soluciones incluidas en la lista Tabú. Tal es el caso de los criterios de aspiración.

## 3 Formulación en el espacio continuo

Para memorizar soluciones exploradas se ha propuesto una forma del algoritmo en que la lista

tabú delimita áreas, dado que una solución ya visitada y las de su entorno reducido, han de tener similares propiedades. Es por ello que la cobertura de soluciones tabú se realiza a partir de dos soluciones ya visitadas y consecutivas de la lista. Por tanto una solución se declara tabú si:

$$dist(P, T[i-1])^2 + dist(P, T[i])^2 < dist(T[i-1], T[i])^2 \quad (1)$$

donde  $dist(A, B)$  es la distancia entre los puntos A y B, y  $T[i]$  es el elemento  $i$ -ésimo de la lista tabú. La figura 1 describe gráficamente el sentido geométrico de esta expresión.

Cuando una nueva solución es aceptada sobre en la lista tabú se actualiza el área de cobertura. Esto confiere al algoritmo la propiedad de salir de mínimos locales. Si tenemos en cuenta que la lista tabú cubre hasta el punto  $S_3$  el punto  $S_4$  es un punto *no tabú*, y por tanto alcanzable. Una vez seleccionado el punto  $S_4$  como nuevo punto base la nueva posición *no tabú* es  $S_5$  contenida en una cuenca de atracción diferente.

El criterio de parada del algoritmo se escoge arbitrariamente como un determinado número de intentos sin mejorar.

## 4 Forma de la lista tabú

El objetivo la lista tabú es cubrir el área explorada. Esta cobertura se va realizando con los puntos recorridos. Esta forma del algoritmo se ha comporta bastante bien en el caso de funciones matemáticas, pero inexacta a la hora de alcanzar mínimos. Por ello se ha visto la conveniencia de asociar una técnica gradencial como el método de Powell en la que, a cada punto explorado se alcance un mínimo local (figura 2). De esta manera la lista tabú se construye con el área recorrida y las cuencas de atracción de los mínimos.

## 5 Aplicación al diseño de AO

Esta concepción del algoritmo se ha mostrado de particular interés en la resolución de problemas de dimensionamiento de Celdas Analógicas. Este problema se plantea como un problema de optimización en el que la función objetivo es la suma de las desviaciones de los valores dinámicos del amplificador frente a las especificaciones pedidas por el usuario. La técnica de resolución de este problema implica la evaluación del comportamiento de las diferentes soluciones mediante un modelo. Si se busca un modelo exhaustivo, basado en SPICE, el número de pruebas se hace crítico. La razón de acudir a este tipo de modelado resulta

ser especialmente interesante debido a que los modelos simplificados llevan a soluciones imposibles cuando las especificaciones solicitadas son críticas. Por ello la técnica anteriormente expuesta es particularmente interesante frente a realizaciones basadas en algoritmos tipo enfriamiento simulado. La figura propone un esquema de la evaluación de la función objetivo basada en el simulador SPICE.

## 6 Resultados Experimentales

Se han escogido tres tipos de celdas amplificadores operacionales a los cuales se ha aplicado esta técnica, amplificador básico de dos etapas (BTS), Cascodo (FCO) y Amplificador Operacional de Transconductancia (OTA). Se han reducido los tiempos de computación de tal manera que ha sido posible utilizar HSPICE para evaluar los diseños. En las tablas adjuntas se exponen los resultados obtenidos a partir de la aplicación de esta técnica. En ella se observa cómo la dispersión de resultados es suficientemente pequeña como para considerar haber alcanzado un óptimo global.

## Bibliografía

- [1] M.Ismail and J.Franca, Eds. "Introduction to analog VLSI design automation". *Kluwer Academic Publishers*, 1990.
- [2] L.R.Carley and R.A.Rutenbar. "How to automate analog IC design". *IEEE Spectrum*, pp.26-30, Aug. 1988.
- [3] H.Y.Koh, C.H.Séquin and P.R.Gray. "OPASYN: a compiler for CMOS operational amplifiers". *IEEE Trans. Computer-Aided Design*, vol. 9, no. 2, pp. 113-125, Feb. 1990.
- [4] J.Chávez, A.Torralba and L.G.Franquelo. "A fuzzy-logic based tool for topology selection in analog synthesis". Accepted for presentation at the *IEEE Int. Symp. on CAS, IS-CAS'94*, to be held in London, May 1994.
- [5] J.Chávez, M.A.Aguirre and A.Torralba. "Analog design automation. A case study". *Proc. IEEE Int. Symp. on CAS*, pp. 2083-2085, 1993.
- [6] F.Glover. "Tabu search part I". *ORSA Journal on Computing*, vol. 1, no. 3, pp. 190-206, 1989.

- [7] F.Glover. "Tabu search part II". *ORSA Journal on Computing*, vol. 2, no. 1, pp. 4-32, 1990.
- [8] S.Areibi and A.Vannelli. "Circuit partitioning using a tabu search approach". *Proc. IEEE Int. Symp. on CAS*, pp. 1643-1646, 1993.
- [9] M.A.Aguirre. "Nuevas Metodologías Heurísticas aplicadas al diseño de circuitos integrados". Tesis Doctoral. Mayo de 1994.

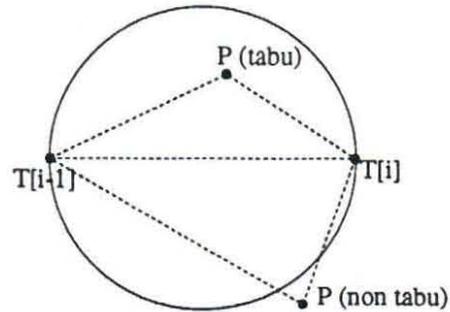


Figura 1: Declaración del estatus "tabú"

BTS:	Enfriamiento Simulado			Búsqueda Tabú		
	Coste Fin.	Ev f.o.	T (s)	Coste Fin.	Ev f.o.	T (s)
1	2.572	90993	27.7	2.595	674	2.7
2	2.763	105223	25.9	2.773	674	2.7
3	3.318	32346	22.8	3.332	674	2.7
4	3.511	37145	23.0	3.522	674	2.7
5	2.888	30990	23.7	2.898	674	2.7
6	3.079	32140	23.9	3.132	674	2.7
7	3.666	32846	22.8	3.690	674	2.7
8	3.859	35439	23.5	3.868	674	2.7

OTA:	Enfriamiento Simulado			Búsqueda Tabú		
	Coste Fin.	Ev f.o.	T (s)	Coste Fin.	Ev f.o.	T (s)
1	0.823	14880	11.9	0.830	681	2.9
2	1.119	15208	12.2	1.222	687	2.9
3	0.895	12301	11.0	0.904	691	2.9
4	1.195	19306	15.0	1.199	682	2.9
5	0.945	14045	12.4	0.956	678	2.8
6	1.242	15381	12.5	1.245	689	3.0
7	1.029	15665	12.8	1.037	684	2.9
8	1.331	15269	12.4	1.336	685	2.9

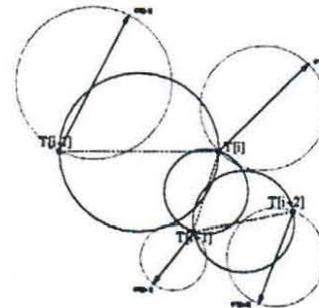


Figura 2: Aspecto geométrico de la lista tabú

Tabla 1: Resultados con un modelo simplificado del circuito BTS y CAS

Especif.	BTS			OTA		
	Diseño	Modelo	Simul.	Diseño	Modelo	Simul.
Gan DC(db)	80	105.262	80.74	60	66.11	54.79
Gan Frec. 1.	1	1.958	0.731	2.5	3.04	1.169
Márgen Fase (deg)	60	68.544	63.51	60	85.17	79.05
Area Activa( $\mu\text{m}^2$ )	< 5000	3167.92	-	< 1000	515.076	-
Cap. Carga (pF)	10	-	1.0	-	-	-

Tabla 2: Resultados de la optimización obtenida con el modelo lineal de la celda, comparados con los resultados utilizando SPICE.

	Coste			Med.SPICE	Med.
	Opt.	Media	Desv. Típ.		
Dis. 1 (OTA)	1.574	1.599	0.019	2077	22
Dis. 2 (OTA)	0.894	0.898	0.007	2042	21
Dis. 3 (OTA)	1.701	1.720	0.015	1931	22
Dis. 4 (BTS)	1.232	1.242	0.014	4123	29
Dis. 5 (BTS)	2.262	2.280	0.018	4132	28
Dis. 6 (BTS)	2.609	2.623	0.022	4311	29
Dis. 7 (FCO)	1.072	1.082	0.008	2985	19
Dis. 8 (FCO)	1.603	1.639	0.019	2869	19
Dis. 9 (FCO)	1.771	1.799	0.020	2990	18

Tabla 3: Coste final obtenido y condiciones de simulación