

ÍNDICE

Presentación	17
1 Introducción al diseño electrónico asistido por ordenador. Ciclo de vida. Diseño, simulación, montaje y pruebas	21
1.1 Introducción, orientaciones para el estudio y objetivos	23
1.2 Palabras clave	23
1.3 Proceso de simulación	23
1.3.1 Captura de esquemas y elección de componentes	24
1.3.2 Compilación – expansión	25
1.3.3 Simulación	25
1.3.4 Diseño del circuito impreso	25
1.3.5 Simulación térmica y de interferencias	26
1.3.6 Fabricación	26
1.3.7 Control de calidad	26
1.3.8 Testabilidad	27
1.4 El ciclo de vida	28
1.4.1 La fase de diseño del ciclo de vida	29
1.4.2 La fase de simulación del ciclo de vida	30
1.4.3 La fase de montaje y pruebas del ciclo de vida	31
1.5 Resumen	33
1.6 Ejercicios de autoevaluación	33
1.7 Ejercicios propuestos	38

2	Símbolos y estándares eléctricos y electrónicos. Normalización	41
2.1	Introducción, orientaciones para el estudio y objetivos	43
2.2	Palabras clave	44
2.3	Introducción histórica	44
2.3.1	Las primeras normas eléctricas	48
2.3.2	Normas eléctricas internacionales	49
2.3.3	La normalización tras la Segunda Guerra Mundial	50
2.4	Las normas	50
2.4.1	Normalización	51
2.4.2	Normalización y certificación	52
2.4.3	Normalización eléctrica	53
2.5	Organismos de normalización	54
2.5.1	ISO - Organización Internacional de Normalización	55
2.5.2	CEI - Comisión Electrotécnica Internacional	56
2.5.3	IEEE - Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos	58
2.5.4	UIT - Unión Internacional de Telecomunicaciones	59
2.5.5	CENELEC - Comité Europeo de Normalización Electrotécnica	60
2.5.6	CEN - Comité Europeo de Normalización	60
2.5.7	AENOR - Asociación Española de Normalización y Certificación	61
2.6	Símbolos electrónicos	63
2.6.1	Símbolos básicos	63
2.6.2	Dispositivos de acoplamiento y accionamiento	68
2.6.3	Símbolos más comunes	70
2.6.4	Producción, transformación y conversión de la energía eléctrica	74
2.6.5	Instrumentos de medida y señalización	79
2.6.6	Semiconductores	82
2.6.7	Operadores analógicos	83
2.6.8	Operadores lógicos binarios	87
2.7	Abreviaturas	88
2.8	Normas	89
2.8.1	Electricidad	89
2.8.2	Electrónica	92
2.9	Simbología de componentes electrónicos	96
2.9.1	Corriente	96
2.9.2	Líneas y conductores	97
2.9.3	Clavijas y conectores	98
2.9.4	Fusibles	98
2.9.5	Baterías y generadores	99
2.9.6	Interruptores	100

2.9.7	Bobinas	101
2.9.8	Transformadores	102
2.9.9	Relés	103
2.9.10	Resistencias	104
2.9.11	Condensadores	105
2.9.12	Diodos	106
2.9.13	Transistores	107
2.9.14	Transistores mosfet e igfet	108
2.9.15	Tiristores	109
2.9.16	Válvulas de vacío	110
2.9.17	Filtros	111
2.9.18	Antenas	112
2.9.19	Audio y video	113
2.9.20	Sistemas digitales	114
2.9.21	Instrumentación	115
2.9.22	Ondas e impulsos	116
2.9.23	Otros símbolos electrónicos	117
2.10	Resumen	118
2.11	Ejercicios de autoevaluación	119
2.12	Ejercicios propuestos	125

3 Programas de diseño de circuitos eléctricos y electrónicos. Funcionalidades y comparación **131**

3.1	Introducción, orientaciones para el estudio y objetivos	133
3.2	Palabras clave	133
3.3	Introducción a la simulación de circuitos	134
3.4	Historia de los simuladores	135
3.5	Estado actual en la simulación de electrónica	137
3.5.1	Software abierto	137
3.5.2	Software comercial	150
3.5.3	Comparación de simuladores	161
3.6	Características generales de los simuladores	165
3.6.1	Capturador de esquemáticos	166
3.6.2	Generador de señales	166
3.6.3	Modelado de componentes	168
3.6.4	Tipos de análisis	168
3.6.5	Postprocesador gráfico	170
3.7	Ventajas y desventajas del uso de simuladores	170
3.7.1	Ventajas	171

3.7.2	Desventajas	172
3.8	Principales herramientas de uso académico y profesional	172
3.8.1	Herramientas de simulación	172
3.9	Software libre y simulación electrónica	177
3.9.1	Introducción e historia del software libre aplicado a la simulación electrónica	177
3.9.2	Programas de código abierto para simulación electrónica	178
3.10	Resumen	183
3.11	Ejercicios de autoevaluación	183
3.12	Ejercicios propuestos	187
4	Diseño de placas de circuito impreso	191
4.1	Introducción, orientaciones para el estudio y objetivos	193
4.2	Palabras clave	193
4.3	Introducción al diseño de PCB	193
4.4	Normas IPC	198
4.5	Terminología	201
4.5.1	Las capas de un circuito	201
4.6	Diseño de circuitos impresos	207
4.6.1	Los parámetros de diseño de PCBs	207
4.6.2	Técnicas de enrutado	211
4.6.3	Herramientas de diseño de un circuito	212
4.7	Los montajes SMD	222
4.7.1	El proceso de montaje SMD	224
4.8	Resumen	227
4.9	Ejercicios de autoevaluación	227
4.10	Ejercicios propuestos	232
5	Selección de Componentes Básicos Eléctricos y Electrónicos. Parámetros	235
5.1	Introducción, orientaciones para el estudio y objetivos	237
5.2	Palabras clave	237
5.3	Simulación por ordenador. Definición y conceptos	237
5.3.1	Conceptos de simulación	238
5.3.2	Definición de modelo	238
5.3.3	Ventajas y desventajas de simulación	239
5.3.4	Estructura de los modelos de simulación	241
5.4	Analogía eléctrica-térmica	243
5.5	Componentes básicos eléctricos	245
5.5.1	Conductores eléctricos	245

5.5.2	Disipador	248
5.5.3	Resistencias lineales	249
5.5.4	Resistencias variables	263
5.5.5	Resistencias no lineales	266
5.5.6	Bobinas	278
5.5.7	Condensadores	283
5.6	Semiconductores	292
5.6.1	Diodos	292
5.6.2	Transistores	298
5.6.3	Marcado de semiconductores	306
5.7	Resumen	308
5.8	Ejercicios de autoevaluación	308
5.9	Ejercicios propuestos	313
6	Diseño de sistemas lógicos digitales desde alto nivel	317
6.1	Introducción, orientaciones para el estudio y objetivos	319
6.2	Palabras clave	319
6.3	Introducción a los sistemas digitales	319
6.3.1	Antecedentes	319
6.3.2	FPGAs	321
6.3.3	HDLs	325
6.4	Diseño y simulación de sistemas lógicos digitales con Quartus Prime. Casos prácticos.	328
6.4.1	Inicio del software Quartus Prime	329
6.4.2	Creación de un nuevo proyecto	330
6.4.3	Diseño de circuitos electrónicos digitales mediante esquemáticos	337
6.4.4	Diseño de circuitos secuenciales mediante grafos de estados	344
6.4.5	Diseño de circuitos secuenciales mediante el lenguaje de descripción hardware VHDL	352
6.4.6	Diseño mediante VHDL y esquemáticos	359
6.4.7	Verificación del diseño. Vector de pruebas y simulación . . .	366
6.5	Resumen	375
6.6	Ejercicios de autoevaluación	375
6.7	Actividades	380
6.8	Ejercicios propuestos	388

7	Modelado de componentes electrónicos digitales	393
7.1	Introducción, orientaciones para el estudio y objetivos	395
7.2	Palabras clave	396
7.3	Introducción al modelado de componentes electrónicos digitales . .	396
7.4	Modelado de componentes electrónicos digitales con OrCAD PSpice	397
7.4.1	Modelado de los niveles lógicos de las señales	398
7.4.2	Modelado de estímulos de entrada	398
7.4.3	Ejemplo de simulación de un circuito electrónico digital con OrCAD PSpice	399
7.4.4	Modelado de sistemas digitales mediante comandos de PSpice	402
7.5	Modelado en VHDL de componentes electrónicos digitales	406
7.5.1	Introducción	406
7.5.2	Introducción al software de simulación de VHDL ModelSim	410
7.6	Modelado de un decodificador	414
7.7	Modelado de un codificador	421
7.8	Modelado de un multiplexor	425
7.9	Modelado de una unidad aritmética	429
7.10	Modelado de una memoria ROM	432
7.11	Modelado de un contador síncrono	434
7.12	Modelado de un registro de desplazamiento	439
7.13	Modelado e implementación de máquinas de estado	442
7.13.1	Introducción	442
7.13.2	Descripción estructural e implementación cableada fija de una máquina de estados de tipo Moore	443
7.13.3	Descripción estructural e implementación cableada fija de una máquina de estados de tipo Mealy	447
7.13.4	Descripción estructural e implementación microprogramada de una máquina de estados de tipo Moore	449
7.13.5	Descripción funcional en VHDL de una máquina de estados de tipo Moore	451
7.13.6	Descripción funcional en VHDL de una máquina de estados de tipo Mealy	455
7.14	Creación de componentes nuevos descritos en VHDL	457
7.14.1	Introducción	457
7.14.2	Diseño estructural en VHDL utilizando componentes defini- dos en paquetes	457
7.15	Resumen	465
7.16	Ejercicios de autoevaluación	465
7.17	Actividades	474
7.18	Ejercicios propuestos	479

8	Tipos de análisis de circuitos electrónicos digitales	487
8.1	Introducción, orientaciones para el estudio y objetivos	489
8.2	Palabras clave	489
8.3	Introducción al análisis de circuitos electrónicos digitales	489
8.4	Introducción al análisis de circuitos electrónicos digitales con OrCAD PSpice	491
8.4.1	Análisis temporal con OrCAD PSpice	491
8.4.2	Análisis eléctrico con OrCAD PSpice	497
8.5	Introducción al análisis de circuitos electrónicos digitales con compila- dores de VHDL	500
8.6	Resumen	510
8.7	Ejercicios de autoevaluación	510
8.8	Actividades	517
8.9	Ejercicios propuestos	526
9	Diseño de sistemas analógicos a través de FPAA	533
9.1	Introducción, orientaciones para el estudio y objetivos	535
9.2	Palabras clave	535
9.3	Introducción a los FPAA	535
9.3.1	CAB	537
9.3.2	Diseño CAD y Procedimiento	538
9.3.3	FPAA de Tiempo Discreto – Capacidades Conmutadas	539
9.4	FPAA de Anadigm	540
9.4.1	Chip AN231E04	541
9.4.2	SingleApex Development Board	543
9.5	AnadigmDesigner®	546
9.5.1	Los CAM	551
9.5.2	Reconfiguración Dinámica en FPAA	555
9.5.3	El proceso de diseño de un circuito para FPAA: VHDL-AMS	557
9.6	Simulación del funcionamiento de un diseño en un FPAA	557
9.6.1	Simulación Genérica de FPAA	558
9.6.2	Simulación a través de AnadigmDesigner®	562
9.6.3	Simulación con Placas Reales de Desarrollo	569
9.6.4	Estado de la Simulación de FPAA	569
9.7	Ejemplo de diseño y programación de un circuito en un FPAA	569
9.7.1	Implementar en AnadigmDesigner® y simular el comporta- miento	572
9.7.2	Requisitos extra, la reconfiguración dinámica	575
9.8	Resumen	585

9.9	Ejercicios de autoevaluación	585
9.10	Actividades	590
9.11	Ejercicios propuestos	603
10	Modelado de componentes electrónicos analógicos	605
10.1	Introducción, orientaciones para el estudio y objetivos	607
10.2	Palabras clave	607
10.3	Modelado y simulación con PSpice	608
10.3.1	El programa de simulación PSpice	610
10.3.2	Principales tipos de análisis de circuitos	612
10.3.3	Ejemplo de simulación con PSpice: doblador de tensión	612
10.3.4	Comandos para modelado y simulación con PSpice	613
10.4	Simulación con OrCAD Capture	613
10.5	Modelado y simulación de dispositivos pasivos	622
10.5.1	Ejemplo de modelado y simulación de un resistor	624
10.5.2	Modelado y simulación del transformador de tensión lineal	625
10.5.3	Modelado y simulación del transformador de tensión real	627
10.6	Modelado y simulación de dispositivos activos	629
10.6.1	Modelo del diodo semiconductor	629
10.6.2	Curva característica del diodo semiconductor	633
10.6.3	El diodo Zener	636
10.6.4	Recortadores, fijadores y multiplicadores	640
10.6.5	El transistor bipolar o BJT	644
10.6.6	El amplificador diferencial	660
10.6.7	El transistor de efecto de campo o FET	663
10.6.8	Modelado del transistor MOSFET	667
10.7	Modelado del amplificador operacional	670
10.8	Creación de componentes nuevos con OrCAD PSpice	671
10.8.1	Uso en PSpice de un subcircuito definido en una biblioteca	671
10.8.2	Creación de un componente nuevo para OrCAD Capture	671
10.9	Resumen	676
10.10	Ejercicios de autoevaluación	676
10.11	Actividades	681
10.12	Ejercicios propuestos	685

11 Tipos de análisis de circuitos electrónicos analógicos	689
11.1 Introducción, orientaciones para el estudio y objetivos	691
11.2 Palabras clave	692
11.3 Introducción	692
11.4 Análisis en continua	693
11.4.1 Análisis del punto de polarización	693
11.4.2 Análisis de transferencia o de pequeña señal	696
11.4.3 Análisis de sensibilidad	699
11.4.4 Análisis de barrido en continua	700
11.5 Análisis transitorio	702
11.5.1 Análisis transitorio con PSpice	704
11.5.2 Análisis transitorio con OrCAD Capture	704
11.6 Análisis paramétrico	709
11.6.1 Análisis paramétrico desde OrCAD Capture	709
11.6.2 Análisis paramétrico con PSpice	713
11.7 Análisis de alterna	713
11.7.1 Análisis de barrido en frecuencia	715
11.7.2 Magnitudes complejas	718
11.7.3 Análisis de ruido	719
11.8 Análisis de Fourier	721
11.9 Análisis avanzados	724
11.9.1 Análisis de Monte Carlo con PSpice	725
11.9.2 Análisis de Monte Carlo desde OrCAD Capture	727
11.9.3 Análisis del Peor Caso	731
11.9.4 Análisis para optimización	731
11.9.5 Prueba de humo	737
11.10Resumen	738
11.11Ejercicios de autoevaluación	739
11.12Actividades	746
11.13Ejercicios propuestos	750
12 Laboratorios, competencias prácticas y experimentación remota	755
12.1 Introducción, orientaciones para el estudio y objetivos	757
12.2 Palabras clave	757
12.3 Laboratorios, competencias prácticas y experimentación remota . .	757
12.3.1 Tipos de laboratorios	758
12.3.2 Ventajas e inconvenientes de los laboratorios	760
12.3.3 Arquitectura de los laboratorios remotos	763
12.3.4 Educación y Laboratorios	769

12.3.5	Estándares	774
12.3.6	Práctica 0 en VISIR	774
12.4	Resumen	790
12.5	Ejercicios de autoevaluación	790
12.6	Actividades	794
12.7	Ejercicios propuestos	799
13	Laboratorios remotos de componentes electrónicos digitales	801
13.1	Introducción, orientaciones para el estudio y objetivos	803
13.2	Palabras clave	803
13.3	Servidores web	803
13.3.1	Tornado	804
13.3.2	Flask	805
13.3.3	Arduino IoT Cloud	805
13.4	Dispositivos, sensores y actuadores	806
13.4.1	Dispositivos de procesamiento, Raspberry Pi	806
13.4.2	Dispositivos de procesamiento, Arduino	816
13.4.3	Sensores y actuadores	823
13.5	Ejemplos de aplicación	829
13.5.1	Robot remoto de 4 ruedas basado en Arduino	829
13.5.2	Robot humanoide remoto basado en lógica programable	830
13.5.3	Laboratorio de experimentación con energía solar	831
13.5.4	Otras ideas adicionales	832
13.6	Resumen	832
13.7	Ejercicios de autoevaluación	833
13.8	Actividades	837
13.9	Ejercicios propuestos	839
14	Laboratorios remotos de componentes electrónicos analógicos (VISIR) y de alto nivel (VISIR/FPAA)	841
14.1	Introducción, orientaciones para el estudio y objetivos	843
14.2	Palabras clave	843
14.3	Introducción general a los laboratorios remotos	843
14.4	Laboratorios remotos dedicados a la electrónica analógica	845
14.4.1	Laboratorio remoto de electrónica inmersivo eLab3D	847
14.4.2	Laboratorio remoto para electricidad básica NetLab	850
14.4.3	Laboratorio remoto para electrónica LaboREM	853
14.5	Laboratorio remoto VISIR	856
14.5.1	Hardware	858

14.5.2	Software	865
14.6	Integración del FPAA en VISIR	871
14.6.1	Aplicación de reconfiguración	871
14.6.2	Aplicación WEB	881
14.6.3	Integración con VISIR	884
14.7	Resumen	891
14.8	Ejercicios de autoevaluación	891
14.9	Actividades	896
14.10	Ejercicios propuestos	911
15	Fiabilidad y testabilidad de componentes y sistemas	913
15.1	Introducción, orientaciones para el estudio y objetivos	915
15.2	Palabras clave	916
15.3	Fiabilidad: concepto y términos fundamentales	916
15.4	Los fallos y su medida	917
15.4.1	Definición de fallo	917
15.4.2	Definición de probabilidad de fallo	917
15.5	Parámetros de medida de la fiabilidad	918
15.5.1	Tasa de fallo	918
15.5.2	Tiempo medio hasta el fallo	919
15.5.3	Tiempo medio entre fallos	919
15.5.4	Diferencias entre MTTF, MTBF y MTTR (tiempo medio para reparar)	920
15.6	Distribución de fallos	921
15.7	Cálculo de la fiabilidad en el modelo de tasa de fallo constante	923
15.8	Fiabilidad de sistemas	924
15.8.1	Sistemas en configuración serie	924
15.8.2	Sistemas con configuración en paralelo	926
15.8.3	Configuración serie-paralelo	930
15.9	Ensayos de fiabilidad	932
15.10	Previsiones sobre la fiabilidad	933
15.11	Normalización y normas	933
15.12	Tolerancias	934
15.13	Definiciones relacionadas con la tolerancia	934
15.14	Representaciones gráficas	935
15.15	Cálculo de tolerancias	937
15.16	Dispersiones en las tolerancias	937
15.17	Tolerancia de sistemas	939
15.17.1	Tolerancia resultante de un sistema serie	940

15.18 Tolerancias geométricas y microgeométricas	941
15.19 Calidad de tolerancia	941
15.20 Límites estadísticos de las tolerancias	942
15.21 Resumen	943
15.22 Ejercicios de autoevaluación	943
15.23 Actividades	947
15.24 Ejercicios propuestos	948
Glosario	951
Solucionario	971
Bibliografía	997

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN AL DISEÑO ELECTRÓNICO ASISTIDO POR ORDENADOR. CICLO DE VIDA. DISEÑO, SIMULACIÓN, MONTAJE Y PRUEBAS

Esquema:

1. Introducción, orientaciones para el estudio y objetivos
2. Palabras clave
3. Proceso de simulación
4. El ciclo de vida
5. Resumen
6. Ejercicios de autoevaluación
7. Ejercicios propuestos

1.1. INTRODUCCIÓN, ORIENTACIONES PARA EL ESTUDIO Y OBJETIVOS

En este tema se exponen los aspectos fundamentales de la simulación y el conexionado, introduciendo conceptos que posteriormente serán ampliados y tratados con más detalle en sucesivos temas del libro. Como segunda parte del tema, se muestra una visión de conjunto del ciclo de vida de creación, desarrollo y uso de circuitos eléctricos y electrónicos, desde la idea inicial al circuito en producción. Se trata de ubicar las herramientas y técnicas que se verán en el libro en cada una de las fases del ciclo de vida.

Los objetivos de este capítulo son plantear la base conceptual que permita al lector familiarizarse con los entornos de simulación de sistemas eléctricos y electrónicos. E identificar cada una de las fases del ciclo de vida y la relación de las distintas ideas, conceptos, herramientas y tecnologías recogidas en el libro con cada una de estas fases.

Este primer tema pretende introducir los conceptos básicos que permitan abordar con éxito los siguientes temas del libro, donde se tratará con mayor amplitud muchos de los conceptos recogidos a continuación.

1.2. PALABRAS CLAVE

CAD, CAE, CAEE, CAM, Captura de esquemas, Ciclo de vida, Circuito impreso, Compilación, Diseño electrónico, Elección de componentes, Fabricación, Montaje de circuitos, PCB, Pruebas, Simulación, Simulación de interferencias, Simulación térmica.

1.3. PROCESO DE SIMULACIÓN

En un entorno de diseño electrónico asistido por ordenador (CAEE, *Computer Aided Electronic Engineering*) se pueden distinguir las etapas que se indican a continuación:

- Captura de esquemas y elección de componentes.
- Compilación – expansión.
- Simulación.
- Diseño del circuito impreso.
- Simulación térmica y de interferencias.

- Fabricación.
- Control de calidad.

En la Figura 1.1 se ha esquematizado, en un diagrama de flujo, las distintas etapas que anteriormente se han citado para el proceso de simulación en un entorno CAEE, para pasar a continuación a realizar una descripción detallada de cada una de ellas.

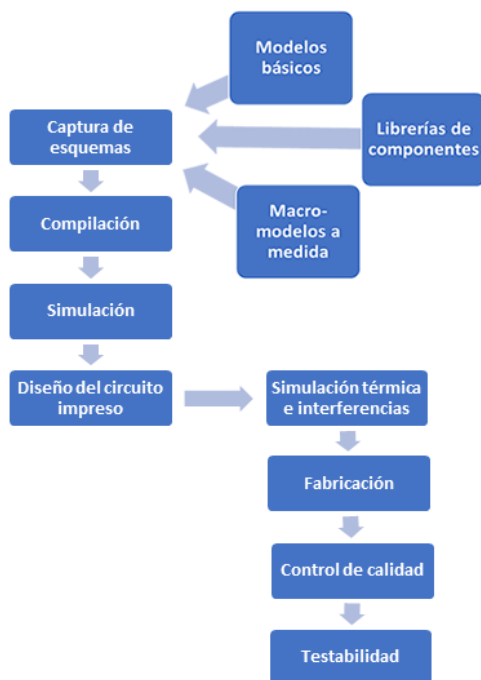


Figura 1.1. Proceso de simulación en un entorno CAEE

1.3.1. Captura de esquemas y elección de componentes

El esquema es el conjunto de componentes presentes en el circuito junto con las conexiones que los unen. La captura de esquemas es el procedimiento de importación de los componentes (*parts*) desde un fichero de librería y su interconexión para crear la topología deseada.

Este proceso de captura se suele realiza mediante un editor gráfico, que añade la interactividad para conseguir de forma rápida y atractiva la definición del circuito y sus características, aunque también se puede realizar dicha operación mediante la

realización de un fichero de texto (*netlist*) en el que se define cada componente, así como los nudos a los que conecta. Conviene tener en cuenta que la primera alternativa evita muchos de los problemas de conexionado que se producen con los editores de texto.

Existen editores de esquemas orientados hacia la delineación del esquema del circuito y su posterior transformación en una placa de circuito impreso (PCB, *Printed Circuit Board*) como OrCAD o CADSTAR que cuentan con programas que transforman dichos esquemas (conocidos como esquemáticos) en ficheros de datos (*netlist*) reconocibles por el programa de simulación, si bien, la mayoría de los programas de simulación actuales ya incluyen su propio editor de esquemas (PSpice, Micro-Cap, etc.).

1.3.2. Compilación – expansión

Este bloque de programas actúa como elemento intermedio entre la captura de esquemas y el simulador, adecuando los formatos de uno y otro sistema. De esta forma, una posible descripción jerárquica del circuito se convierte en una descripción plana que entiende el simulador. En esta fase también se suelen comprobar todas las conexiones del circuito buscando nodos desconectados y cortocircuitos.

1.3.3. Simulación

Este proceso, que es el más crítico, se debe realizar de forma interactiva entre el usuario (diseñador) y la herramienta de simulación.

En la herramienta de simulación, el usuario introduce los estímulos del circuito, estableciendo las condiciones iniciales y las bases de tiempo. Una vez realizada una simulación, y a la vista de los resultados, el diseñador debe contrastar los requerimientos del diseño con los resultados obtenidos, pudiendo realizarse los cambios necesarios para ir adecuándose a las especificaciones iniciales.

1.3.4. Diseño del circuito impreso

Partiendo del fichero *netlist* obtenido del esquema del circuito se pasa al trazado de la placa de circuito impreso o PCB. Este trazado se obtiene de forma muy sencilla mediante unas aplicaciones llamadas normalmente *AUTOROUTER*, que de forma automática emplazan los componentes y, posteriormente, colocan las pistas siguiendo alguna estrategia de optimización predefinida y que el usuario puede seleccionar de entre una serie de ellas. Es habitual que algunas pistas del diseño queden sin trazar,

siendo necesario en estos casos, realizar un trazado manual para dichas pistas mediante otra utilidad denominada *ROUTER*.

1.3.5. Simulación térmica y de interferencias

Tiene una gran relevancia la simulación del conjunto de los componentes y la placa de circuito impreso, para poder tener en cuenta las interacciones térmicas entre componentes que disipen mucho calor y sus adyacentes, entre los que emiten campos electromagnéticos que perturban otros componentes próximos o las interacciones entre pistas próximas del trazado de una placa. Estos factores son de gran importancia si se hace referencia a los circuitos realizados con Tecnología de Montaje Superficial (SMD, *Surface Mounted Devices*), donde la distancia entre pistas y entre componentes está minimizada, y especialmente a los circuitos de potencia donde se integran señales de control y de potencia en una misma placa.

1.3.6. Fabricación

Una vez finalizado el proceso de diseño y de depuración de un circuito, incluyendo la disposición física de los componentes y el trazado de las pistas en la placa de circuito impreso, existen utilidades que enlazan el CAD (*Computer Aided Design*) y el CAE (*Computer Aided Engineering*) con el CAM (*Computer Aided Manufacturing*), de manera que a partir de los ficheros de trazado generan códigos para su realización física mediante procesos más o menos automatizados de fabricación. Estos procesos de fabricación pueden ir desde la realización de la placa de circuito impreso hasta la inserción automática de los componentes.

1.3.7. Control de calidad

En el diseño puede haberse previsto la realización automática de ciertas pruebas para comprobar que el producto final funciona correctamente de acuerdo con las especificaciones iniciales. Para este cometido se pueden utilizar camas de puntas de prueba o pruebas digitales de tipo JTAG. Existen programas que se encargan de realizar estas pruebas de calidad y funcionalidad y que necesitan de los datos proporcionados en las simulaciones previas para ser efectivos.

1.3.8. Testabilidad

Un aspecto en el diseño de los circuitos integrados y de sistemas completos de gran importancia es la testabilidad, debido a que es uno de los factores de mayor coste en el desarrollo de estos.

Hasta ahora todos los tipos de simulación vistos han ido encaminados a comprobar que el circuito o sistema en cuestión es funcionalmente correcto, es decir, realiza la función para la cual se ha diseñado, pero no se ha mencionado los posibles fallos de fabricación y de su detección. La testabilidad es la facilidad con la que se puede verificar la correcta fabricación de un circuito o sistema funcionalmente bien diseñado, y que no debe confundirse con la depuración del circuito o sistema, que consiste en comprobar su funcionalidad.

Existen diversos parámetros para medir la testabilidad de un circuito, como, por ejemplo, la cobertura de fallos, la controlabilidad y la observabilidad de los nodos de un circuito.

Cuanto más avanzado esté el proceso de fabricación, más complejo (y, por consiguiente, más caro) es el test del circuito o sistema, por lo que cuanto antes se detecte el fallo de fabricación o montaje menos coste tendrá el producto final.

Además, el tiempo de test de un circuito o sistema encarece enormemente el mismo, con lo que cuanto más fácil y rápido resulte el test, menor será el coste.

Basándose en esta filosofía se introduce el concepto de Diseño para la Testabilidad o DFT (*Design For Testability*), que consiste en preparar el circuito desde las primeras etapas del diseño para que sea fácilmente testable. Una buena herramienta CAD de diseño y simulación de circuitos debe estar preparada para el DFT.

Además del DFT debe hacerse el test apropiado, de manera que sean detectables el máximo número de fallos posibles y que todos los circuitos defectuosos sean rechazados. En general para testear un circuito o sistema se les introducen unos valores a las entradas (vectores de test) y se comparan con los valores esperados.

Actualmente se disponen de herramientas de análisis de la testabilidad de un circuito (por ejemplo, cobertura de fallos, controlabilidad y observabilidad de los nodos de un circuito), de Generación Automática de Vectores de Test o ATPG (*Automatic Test Pattern Generation*), de evaluación de la calidad del test a realizar (mediante simuladores de fallos en los circuitos) y de síntesis de lógica necesaria para el test.

Los tipos de fallos que se pueden dar son muy variados (cortocircuitos, pistas abiertas, componentes erróneos, falta de componentes, componentes mal colocados, fallos de cableado, fallos digitales, fallos analógicos, etc.) y para cada uno de ellos existe un test distinto. Estadísticamente se elige el modelo de fallo que se da con mayor frecuencia y con el que se detecta mayor número de circuitos defectuosos, denominado *Stuck-at fault*.

Para la simulación de fallos en circuitos se han desarrollado diversos algoritmos de distintas características y aplicaciones, siendo los principales los que se citan a continuación:

- Simulación de fallos serie, que, si bien resultan sencillos y precisos, son ineficientes en circuitos grandes.
- Simuladores con vectores en paralelo, más rápidos, pero sólo válidos para lógica combinacional y para un determinado tipo de fallos.
- Simulación reductiva.
- Simulación concurrente.
- PPSFP (*Parallel Pattern Single Fault Propagation*), es igual al de simulación serie, pero simulando varios vectores de test en paralelo.

Una vez simulados los fallos y comprobando que el conjunto de vectores de test escogidos es el más apropiado para el circuito en cuestión se pasa esta información al fabricante para que realice el test como un paso más del proceso de fabricación, consiguiendo que todos los circuitos que pasen a la venta no contengan fallos.

1.4. EL CICLO DE VIDA

Una vez abordado las diferentes etapas en el diseño electrónico asistido por ordenador, la siguiente parte a tratar en este tema es el ciclo de vida de los circuitos eléctricos y electrónicos.

Por “ciclo de vida” se entiende, en el contexto del CAE, al ciclo que va desde que un cierto análisis de un problema lleva a un diseño de un circuito eléctrico o electrónico (CAEE), hasta que se tiene un circuito real montado y probado. El diseño inicial es el punto de entrada en este ciclo de vida, que condensa de manera esquemática muchos de los aspectos que se analizan en este libro. El ciclo de vida (Figura 1.2) se puede describir como compuesto de 3 fases:

- Fase de diseño, en la que se han de tener en cuenta todos los detalles de modelos y componentes, que permitan describir lo mejor posible el circuito.
- Fase de simulación, en la que mediante las herramientas seleccionadas se “experimenta” de manera simulada y se obtiene y verifica el comportamiento eléctrico y/o electrónico asociado con el diseño previo.

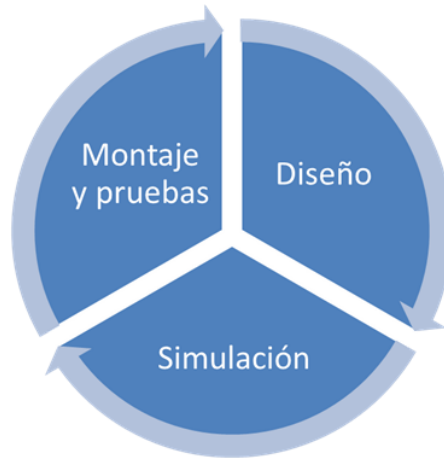


Figura 1.2. Esquema del ciclo de vida

- Fase de montaje y pruebas, en la que se montan los circuitos ya simulados, creando los circuitos impresos, tarjetas de circuito impreso o PCB.

Siendo este capítulo una aproximación general, que trata de ubicar muchas de las tecnologías, ideas, etc., (descritas en el libro), en un esquema general, el resto del capítulo explora con más detalle cada una de estas tres fases.

1.4.1. La fase de diseño del ciclo de vida

Como se ha comentado previamente en este capítulo, a esta fase se llega (Figura 1.3) tras un análisis previo de un sistema real, que lleva a crear un modelo para tal sistema. Se pueden usar en esta fase herramientas informáticas de ayuda al diseño, CAD.

Las ventajas generales de iniciar tal diseño son:

- Que no exista una formulación matemática completa del problema.
- Que la simulación permita atacar el problema de manera más rápida e intuitiva que los métodos analíticos disponibles.
- Se desea observar el trayecto histórico simulado del proceso sobre un periodo, además de estimar ciertos parámetros.

En este análisis previo se tienen en cuenta una serie de variables fundamentales para el resto de las fases:

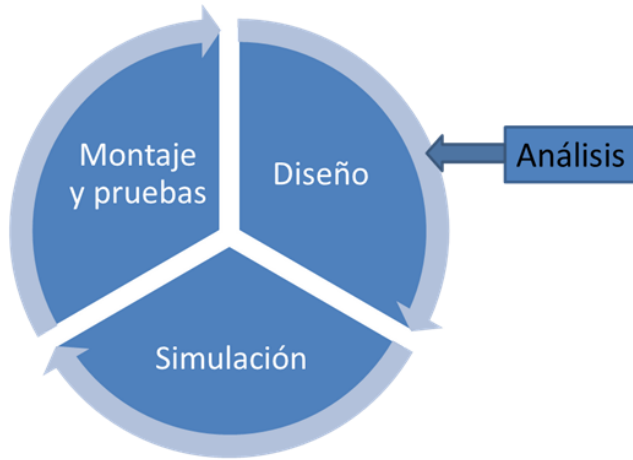


Figura 1.3. Entrada al ciclo de vida desde el análisis previo

- Si se deseará o no introducir variables para hacer una buena simulación térmica, en la que se tendrán en cuenta las interacciones térmicas entre componentes que disipen mucho calor y sus adyacentes.
- El diseño para la testabilidad, que consiste en preparar el diseño del circuito para que sea testeable y se pueda probar con facilidad.

1.4.2. La fase de simulación del ciclo de vida

En esta fase, y mediante el uso adecuado de las herramientas de simulación, se simula el circuito diseñado.

No se van a repetir en este capítulo todos los conceptos e informaciones ya analizadas previamente, relacionados con la simulación, como modelado, programas, esquemas, componentes, etc., pero si es importante señalar que tienen en esta fase su ubicación en el ciclo de vida. Si es importante recordar que este proceso es el más crítico y lo realiza el usuario interactivamente con la herramienta de simulación.

Mediante la herramienta seleccionada el usuario introducirá los estímulos del circuito, establecerá las condiciones iniciales y las bases de tiempo.

Al analizar los resultados obtenidos por la simulación, el diseñador debe contrastar los requerimientos del diseño con los resultados. Es posible que el resultado no sea el buscado y, en este caso, lo habitual es volver a la fase anterior para replantearse el diseño realizado, (Figura 1.4).