

Universidad Tecnológica de la Mixteca

**Desarrollo de una Herramienta de
Simulación para el Estudio de Convertidores
CD/CD Básicos sin Aislamiento Galvánico**

Tesis para obtener el título de

Ingeniero en Electrónica

Presenta

Edilberto Santa María Caro

Director de tesis

M.C. Esteban O. Guerrero Ramírez

Asesor de tesis

Ing. Heriberto I. Hernández Martínez

Huajuapán de León, Oaxaca

Junio del 2008

Tesis presentada el 27 de Junio de 2008
ante los sinodales:

Dr. Jesús Linares Flores
M.C. Jorge Luis Barahona Ávalos
M.C. Hugo Suárez Onofre

Director de tesis:
M.C. Esteban O. Guerrero Ramírez

Asesor de tesis:
Ing. Heriberto I. Hernández Martínez

Dedicatoria

*A mis padres Juan y Brígida.
A mis hermanos Oscar y Tania.*

Agradecimientos

A mi director M.C. Esteban O. Guerrero Ramírez y a mi asesor Ing. Heriberto I. Hernández Martínez por su apoyo y consejos durante el desarrollo de este trabajo de tesis.

A mis sinodales Dr. Jesús Linares Flores, M.C. Jorge Luis Barahona Ávalos y M.C. Hugo Suárez Onofre por el tiempo dedicado a la revisión del documento.

Al M.C. Mario Moreno Rocha e Ing. Dayfel Luis Hernández Martínez por las facilidades prestadas para el uso del UsaLab.

A mis compañeros tesistas José Peña Toledo, Rabí Villalobos, Alejandro Manzano, José Luis Cuevas, Ignacio Arroyo, Carlos Bautista y Víctor Bolaños por el ambiente de trabajo generado en el laboratorio.

A mis amigos Elfrich, Sandoval, Rafael, Manuel, Jesús Emanuel, Susana, Olga, Nadia, Melina, Sahady, Arlette y Donají por su cariño y apoyo brindados en el desarrollo de este trabajo de tesis.

A todos mis compañeros y amigos que estuvieron conmigo en esta universidad durante 5 años.

Schließlich, Gott sei dank für alle Sein liebe, hilfe und ist immer mit mir.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema	4
1.3. Justificación	7
1.4. Objetivos	7
1.4.1. Objetivo Principal	7
1.4.2. Objetivos secundarios	7
1.5. Metas	7
1.6. Estructura de la tesis	8
2. Circuitos Convertidores	9
2.1. Historia de la electrónica de potencia	10
2.2. Convertidores CD/CD	12
2.2.1. Topologías básicas con un único interruptor controlado	14
2.2.2. Convertidor reductor	19
2.2.3. Convertidor elevador	25
2.2.4. Aplicaciones de los convertidores CD/CD	32
3. Metodología de Desarrollo	35
3.1. Definición de la Interacción Humano-Computadora	35
3.2. Justificación y selección del RUP	36
3.2.1. Comparación entre metodologías	36
3.2.2. El Proceso Unificado Racional	36
4. Desarrollo de la aplicación SimEP	43
4.1. Planeación inicial	43

4.1.1. Herramientas de software involucradas	43
4.2. Requisitos del SimEP	44
4.2.1. Actores y casos de uso	44
4.2.2. Función de los casos de uso del SimEP	44
4.3. Análisis y diseño	45
4.3.1. Análisis	46
4.3.2. Diseño	46
4.3.3. Especificación de Casos de Uso	48
4.4. Implementación	60
5. Pruebas de usabilidad	63
5.1. Usabilidad	63
5.2. Importancia de la usabilidad	64
5.3. Métodos utilizados en pruebas de usabilidad	65
5.4. Descripción de las pruebas de usabilidad	66
5.4.1. Facilitador	66
5.4.2. Observadores	67
5.4.3. Participantes de las pruebas	67
5.4.4. Elaboración de las pruebas	67
5.4.5. Ejecución de tareas	69
5.4.6. Preguntas finales	69
5.5. Resultados finales	71
6. Conclusiones y trabajos futuros	73
A. Manual de usuario del SimEP	77
A.1. Recursos necesarios para ejecutar el SimEP	77
A.2. Ejecutar la aplicación SimEP	78
A.3. Menú Principal	78
A.4. Marco teórico	79
A.5. Simulador	80
A.6. Examen	82
B. Caso de uso elevador	85

C. Caso de uso reductor

91

Índice de figuras

1.1. Diagrama a bloques del SimEP	5
2.1. Clasificación de los semiconductores de potencia	12
2.2. Clasificación de los convertidores CD/CD conmutados PWM	14
2.3. Inductores y capacitores en régimen permanente	15
2.4. Formas de onda en el inductor	16
2.5. Relación entre la corriente de salida y el valor medio de la misma	17
2.6. Modo de funcionamiento continuo y discontinuo	18
2.7. Parámetros que influyen en el modo de funcionamiento	18
2.8. Estructura del convertidor reductor	19
2.9. Modo de conducción continuo para el convertidor reductor	20
2.10. Formas de onda de corriente de los diferentes dispositivos	21
2.11. Modo de conducción discontinuo para el convertidor reductor	23
2.12. Formas de onda en modo de conducción discontinuo	24
2.13. Estructura del convertidor elevador	25
2.14. Modo de conducción continuo para el convertidor elevador	26
2.15. Formas de onda de corriente en los diferentes dispositivos	26
2.16. Formas de onda de corriente en el capacitor	29
2.17. Modo de conducción discontinuo para el convertidor elevador	30
2.18. Formas de onda de corriente y voltaje	30
3.1. Flujos de trabajo del RUP	38
4.1. Diagrama general de los casos de uso del SimEP	45
4.2. Diagrama de clases para el caso de uso marco teórico	49
4.3. Diagrama de secuencia para el caso de uso marco teórico	50
4.4. Diagrama de actividades para el caso de uso marco teórico	50

4.5. Diagrama de colaboración para el caso de uso marco teórico	51
4.6. Diagrama de secuencia para el caso de uso simulador	53
4.7. Diagrama de colaboración para el caso de uso simulador	53
4.8. Diagrama de actividades para el caso de uso simulador	54
4.9. Diagrama de clases para el caso de uso simulador	55
4.10. Diagrama de clases para el caso de uso realizar examen	56
4.11. Diagrama de secuencia para el caso de uso realizar examen	57
4.12. Diagrama de colaboración para el caso de uso realizar examen	57
4.13. Diagrama de actividades para el caso de uso realizar examen	57
4.14. Diagrama de clases para el caso de uso evaluar examen	59
4.15. Diagrama de secuencia para el caso de uso evaluar examen	59
4.16. Diagrama de colaboración para el caso de uso evaluar examen	59
4.17. Diagrama de actividades para el caso de uso evaluar examen	60
5.1. Ventana del simulador en fase de prototipo	70
5.2. Ventana del simulador modificado	70
A.1. Menú principal del SimEP	78
A.2. Índice del marco teórico	79
A.3. Animaciones del marco teórico	80
A.4. Bloque formas de onda del simulador	81
A.5. Bloque dispositivos del simulador	82
A.6. Bloque de resultados del simulador	83
A.7. Etapa de examen del SimEP	83
A.8. Resultados de la etapa de examen del SimEP	84
B.1. Resultados del SimEP para el convertidor en modo continuo	87
B.2. Resultados del SimEP para el convertidor en modo discontinuo	89
C.1. Resultados del SimEP para el convertidor en modo continuo	94
C.2. Resultados del SimEP para el convertidor en modo discontinuo	95

Índice de tablas

2.1. Volumen de mercado de fuentes lineales contra fuentes conmutadas en E.U.A.	13
3.1. Comparación entre las metodologías de desarrollo de software	40
3.2. Flujos de trabajo estáticos en el RUP	41
4.1. Historial de revisiones del caso de uso marco teórico	49
4.2. Flujo básico del caso de uso marco teórico	49
4.3. Historial de revisiones del caso de uso simulador	52
4.4. Flujo básico del caso de uso simulador	52
4.5. Historial de revisiones del caso de uso realizar examen	55
4.6. Flujo básico del caso de uso realizar examen	56
4.7. Historial de revisiones del caso de uso evaluar examen	58
4.8. Flujo básico del caso de uso evaluar examen	58

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

El avance de la tecnología hasta nuestros días ha sido significativo, mostrando una sorprendente gama de equipos e instrumentos que se crean para cumplir con las necesidades del hombre. Dentro de este vasto grupo, la computadora ha surgido como una herramienta que tiene aplicaciones en muchos campos, como por ejemplo en la educación, brindando un aprendizaje integral, novedoso y de gran impacto.

La influencia de la computadora a través de sus diversas aplicaciones en las diferentes áreas del conocimiento ha hecho de ésta una herramienta vital en la vida práctica de las personas en sus áreas de trabajo.

Las mejoras en el hardware de la computadora son notables a través de una disminución del tamaño, en comparación al que tenían sus precursoras, además del incremento en la velocidad de procesamiento y en la capacidad de almacenamiento. Indudablemente, su precio ha disminuido considerablemente, dando la posibilidad a los usuarios de adquirir un equipo con mayor facilidad.

Los avances en el software se han reflejado a través de diversos desarrollos y aplicaciones que han surgido en los últimos años, con una evolución en cuanto a la manera de interactuar entre el usuario y la computadora; de ser primero a través de una línea de comandos hasta tener una interfaz gráfica y amigable. De esta manera, surgen áreas, como la de sistemas expertos e inteligencia artificial; así como nuevas herramientas para poder desarrollar aplicaciones [12].

Con estos logros, el hombre se ha aventurado en nuevas áreas de investigación, po-

niéndose como metas el ir más allá de lo tradicional, marcando nuevos límites. Dentro de todo este entorno, puede nombrarse las aplicaciones en diversos campos, como es el caso de la educación.

El mejoramiento de este campo a través del refinamiento de las técnicas de aprendizaje, permite que las nuevas generaciones incorporen herramientas que no existían hace algunos años, como es el uso de la computadora en el modelo enseñanza-aprendizaje. El alto grado de tecnología involucrado en el proceso de enseñanza es una consecuencia de la evolución hacia una sociedad que requiere la integración de la tecnología en los diferentes procesos que realiza [23].

Un software educativo hace uso de la computadora para mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje, esto lo hace una herramienta competitiva dado que el uso de nuevas tecnologías y el diseño interactivo de materiales didácticos permiten una relación básica entre los diferentes elementos que integran cualquier proceso formativo. Estos elementos son: el estudiante, el profesor y los materiales complementarios [23].

Se denomina software educativo a los programas creados con la finalidad de específica de ser utilizados como medio didáctico, es decir, para facilitar los procesos de enseñanza y aprendizaje. Todo esto implica que de alguna manera, parte del contenido de aprendizaje que se pretende lograr estará sustentado, implícita o explícitamente en los sistemas multimedia [23].

Los sistemas multimedia ofrecen una excelente oportunidad para el aprendizaje interactivo, ya que se caracterizan por su capacidad de integrar todos los elementos o lenguajes de comunicación pertenecientes a los campos de la percepción visual y acústica (texto, sonido, gráficos e íconos, imágenes estáticas, animaciones, etc.). A continuación se describe brevemente la función que pueden realizar cada uno de estos campos:

- **Texto:** Permite desarrollar la comprensión oral, favorece la comprensión y la profundización de los temas, permite aclarar la información gráfica o icónica
- **Sonido:** Facilitan la comprensión de la información clarificándola, pueden estar orientadas a completar el significado de las imágenes, música y efectos sonoros para conseguir un efecto motivador captando la atención del usuario.
- **Gráficos e íconos:** Permiten la representación de palabras, conceptos e ideas mediante dibujos o imágenes.

- **Imágenes estáticas:** Su finalidad es ilustrar y facilitar la compresión de la información que se desea transmitir.
- **Animaciones:** Transmiten de forma visual secuencias completas de contenido. Puede simularse eventos que son difíciles de observar en forma real.

Teniendo en cuenta lo anterior, se desarrolló un software educativo multimedia en el área de Electrónica de Potencia que permite la simulación de las configuraciones básicas de los convertidores CD/CD sin aislamiento galvánico: reductor y elevador, el cual incluye las principales características, funcionamiento, manipulación y simulación de dichos convertidores de manera interactiva.

Existen dos términos usados frecuentemente para tipos de convertidores CD/CD; aislados y no aislados. Este aislamiento se refiere a la existencia de una barrera eléctrica entre la entrada y la salida del convertidor CD/CD. Muchas aplicaciones de seguridad requieren una separación entre el voltaje aplicado de entrada y el voltaje de salida. Un convertidor CD/CD aislado tiene un transformador de alta frecuencia que provee dicha barrera.

En contraste, los convertidores CD/CD no aislados tienen un camino de cd entre su entrada y salida. Además, ya que los dispositivos no aislados son de menor tamaño y menos costosos, son utilizados para fuentes de alimentación de cd de alta densidad de potencia para computadoras, adaptadores, laptops, comunicación e instrumentación [13].

Algunos trabajos relacionados con los convertidores CD/CD básicos sin aislamiento galvánico son los siguientes [3], [18], [7], [17], [8]:

- *Bifurcaciones en la frontera de colisión en el convertidor reductor*, Universidad de Maryland, Estados Unidos.
- Control de velocidad de un motor de cd a través de un convertidor de potencia CD-CD, CINVESTAV-IPN, México.
- *Mapas de tiempo discreto para el análisis de bifurcaciones y caos en convertidores CD-CD*, Universidad de Bristol, Inglaterra.
- *Análisis en régimen permanente de un convertidor elevador acoplado con inductores*, Tecnológico de Hong Kong.
- *Estudio del caos en el convertidor reductor*, Universidad de Cataluña, España.

La importancia de este software es mejorar la comprensión de los temas tratados en el curso de Electrónica de Potencia por parte de los estudiantes mediante una forma sencilla y eficaz, en este caso a través de una herramienta gráfica multimedia. La simulación por computadora permite comprobar de una forma rápida y cómoda situaciones distintas, esto puede por un lado facilitar la tarea de análisis y comprobación de temas vistos en clase, así como la realización de nuevos diseños cuya respuesta puede ser prevista y comprobada antes de ser llevada a la práctica.

Actualmente existe desarrollo de software educativo multimedia en el área de Electrónica en distintas universidades, algunos por nombrar son los siguientes [1], [10], [5], [9], [14], [11]:

- *Sistema Tutor Multimedia de Electrónica de Potencia: Amplificadores de potencia*, Universidad de Jaén, España.
- *Material Educativo Computarizado para Enseñanza de la Instrumentación Básica en Electrónica*, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- *Nuevos Materiales Educativos en la Enseñanza Teórica y Práctica de la Electrónica*, Universidad de Castilla La Mancha, España.
- *Aplicación de Tecnologías Multimedia para el Aprendizaje Asíncrono de Instrumentación Electrónica*, Universidad de Sevilla, España.
- *Sistema Multimedia de Apoyo a las Prácticas de Electrónica de Potencia*, España.
- *Sistema para la Enseñanza y el Aprendizaje de los Microcontroladores*, Universidad de Coimbra, Portugal.

1.2. Planteamiento del problema

El sistema que se desarrolló, el cual de ahora en adelante denominaremos SimEP (Simulador de Electrónica de Potencia) es un software interactivo que permite simular circuitos convertidores CD/CD básicos sin aislamiento galvánico. El SimEP es un sistema que consiste en varias partes, cada una de ellas con un objetivo y un comportamiento diferente de las demás, pero con una meta en común. En la siguiente figura se muestra el diagrama a bloques del SimEP, cuyas etapas son: Selección, Marco Teórico, Simulación, Examen y

Evaluación.

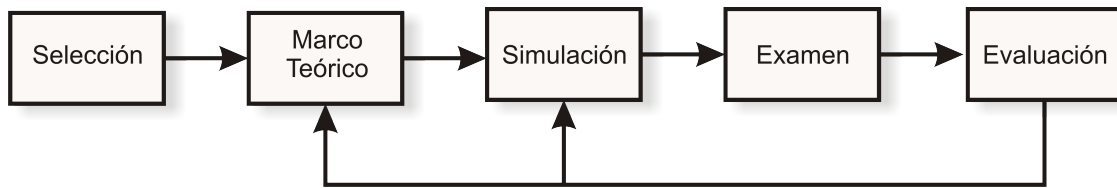


Figura 1.1: Diagrama a bloques del SimEP

Selección: Cabe mencionar que la gama de convertidores CD/CD en circuitos de potencia es muy amplio. Por esa razón, el SimEP sólo contempla dos convertidores básicos sin aislamiento galvánico en Electrónica de Potencia: convertidor elevador y convertidor reductor. Por lo tanto, en el bloque de selección el usuario podrá elegir el tipo de convertidor que desea estudiar.

Marco Teórico: Etapa diseñada para presentar las bases teóricas con el objetivo de que el usuario pueda realizar el análisis del circuito característico del convertidor CD/CD sin aislamiento galvánico, además muestra las ecuaciones matemáticas que definen el comportamiento del convertidor seleccionado.

Simulación: Este modulo comprende una GUI¹ que permite al usuario elegir el tipo de resultado que desea visualizar; además de la posibilidad de configurar los valores de los elementos del convertidor CD/CD sin aislamiento galvánico. Se implementa un cuadro de diálogo a cada elemento para facilitar la configuración. Los resultados se muestran matemáticamente y en forma gráfica. Cuando existe una variación en los parámetros de entrada del sistema, éste despliega de manera instantánea los datos.

Examen: En esta etapa se formulan una serie de preguntas con la finalidad de que el usuario evalúe los conocimientos adquiridos. Cada pregunta contiene cuatro posibles respuestas que él puede seleccionar. Una vez que haya realizado la selección que considere correcta, el SimEP mostrará la siguiente pregunta.

Evaluación: La etapa de evaluación se alimenta de las respuestas de la etapa de

¹Interfaz Gráfica de Usuario, de sus siglas en inglés *Graphic User Interface*

examen, esta etapa analiza dichas respuestas y si el resultado es no aprobatorio (menor a 6 puntos), el usuario puede elegir entre regresar a la etapa de marco teórico o al simulador.

En la actualidad las empresas de desarrollo de software tienden a crear software más grande y complejo, además los clientes tienden a ser más exigentes en cuanto a la calidad, tiempo, eficacia y eficiencia del software a entregar, esto ha llevado a que el análisis y diseño de los sistemas de software se lleven a cabo bajo un proceso riguroso. Por lo anterior durante el ciclo de vida del SimEP se emplean las técnicas del RUP ² y el lenguaje UML ³. El RUP es un proceso de desarrollo de software definido como el conjunto de actividades necesarias para transformar los requisitos de un usuario en un sistema de software [15].

Las características que definen al RUP son [16]: está dirigido por casos de uso, está centrado en la arquitectura y es iterativo e incremental; además está dividido en 4 fases: inicio, elaboración, construcción y transición. Estas fases son utilizadas durante el tiempo de vida del software, cada una de las cuales se divide en un conjunto de iteraciones que se repiten a lo largo de una serie de ciclos, donde al término de cada ciclo se obtiene una versión del software listo para ser entregado al cliente. Una iteración puede pasar por los cinco flujos de trabajo fundamentales del RUP: requisitos, análisis, diseño, implementación y pruebas.

En cuanto al lenguaje de modelado, se utilizó el UML por ser un estándar en el análisis y diseño de sistemas de software. UML es un lenguaje de modelado gráfico y visual utilizado para especificar, visualizar, construir y documentar los componentes de un sistema de software. Está pensado para utilizarse en cualquier proyecto de desarrollo que necesite capturar requerimientos y comportamientos del sistema que se desee construir [16].

UML permite captar la información sobre la estructura estática y dinámica de un sistema, en donde la estructura estática proporciona información sobre los objetos que intervienen en determinado proceso y las relaciones que existen entre ellos. La estructura dinámica define el comportamiento de los objetos a lo largo de todo el tiempo que estos interactúan hasta llegar a cumplir con sus objetivos [26].

²Proceso Unificado Racional, de sus siglas en inglés *Rational Unified Process*

³Modelo de Lenguaje Unificado, de sus siglas en inglés *Unified Model Language*

1.3. Justificación

El SimEP está enfocado a la enseñanza-aprendizaje en el área de la Electrónica de Potencia, cuyos usuarios finales son estudiantes y profesores del área mencionada. Respecto a los alumnos, el sistema es una guía para conocer las características de los convertidores CD/CD básicos sin aislamiento galvánico en su configuración reductora y elevadora. Para los profesores, una herramienta que les permita analizar y simular dichos convertidores.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo Principal

Desarrollar un sistema que sea capaz de mostrar y simular el comportamiento de los convertidores CD/CD básicos sin aislamiento galvánico de Electrónica de Potencia en sus configuraciones reductor y elevador.

1.4.2. Objetivos secundarios

- Aprender el funcionamiento de los convertidores CD/CD básicos sin aislamiento galvánico en su configuraciones reductor y elevador .
- Analizar y simular un convertidor reductor o elevador.
- Presentar una herramienta dinámica para la comprensión del funcionamiento de dichos convertidores.
- Desarrollar un software educativo.

1.5. Metas

- Permitir la realización de prácticas de Electrónica de Potencia en el laboratorio en forma interactiva, sin necesidad de contar con un circuito físico.
- Desarrollar una herramienta de apoyo para los estudiantes y profesores de Electrónica de Potencia que permita analizar y simular los convertidores CD/CD del tipo reductor y elevador.

- Diseñar una herramienta que no requiera de un proceso de instalación, y que sea posible ejecutarla en cualquier PC con sistema operativo Windows 9x/NT/2000/XP/Vista.

1.6. Estructura de la tesis

La presentación de este documento se detalla de la siguiente manera: El capítulo 2 presenta una descripción de los circuitos convertidores del tipo CD/CD en el área de electrónica de potencia. El capítulo 3 describe la metodología utilizada para el desarrollo del SimEP. El capítulo 4 describe el desarrollo del SimEP en base a los flujos del RUP. El capítulo 5 presenta las pruebas de usabilidad realizadas al SimEP. Mientras que en el capítulo 6 se dan las conclusiones y trabajos futuros. Finalmente, se muestran las referencias bibliográficas y los documentos consultados para la realización de este trabajo.

Capítulo 2

Circuitos Convertidores

Con el desarrollo de la tecnología de los semiconductores de potencia, las capacidades de manejo y la rapidez de conmutación de los dispositivos han mejorado notablemente. El desarrollo de los microprocesadores y la tecnología de las microcomputadoras tienen gran impacto sobre el control y la sintetización de la estrategia de control para los dispositivos semiconductores de potencia. El equipo moderno de electrónica de potencia emplea: 1) semiconductores de potencia que se puedan considerar como el músculo y 2) la microelectrónica, que tiene el poder y la inteligencia de un cerebro [25].

Muchos de los sistemas de electrónica de potencia consisten en dos módulos: 1) la etapa de potencia y 2) la etapa de control (circuito de retroalimentación). La etapa de potencia maneja la transferencia de energía de la entrada a la salida, y la retroalimentación controla la cantidad de energía transferida a la salida.

La función de la etapa de potencia es mejorar la conversión actual de energía y procesarla de la entrada a la salida. El control de la energía de salida se lleva a cabo a través de señales de control aplicadas a dispositivos conmutadores. Dicha conversión se refiere al cambio en: forma de voltaje (ca o dc), nivel de voltaje (magnitud), frecuencia de la señal, forma de onda de voltaje (senoidal o no senoidal, tal como cuadrada, triangular o diente de sierra), o fase de voltaje (monofásica o trifásica) [4].

Los convertidores CD/CD son circuitos electrónicos que convierten un voltaje continuo en otro nivel de voltaje continuo, y proporcionan una salida regulada. Dichos circuitos se clasifican como convertidores CD/CD en modo conmutado o convertidores CD/CD conmutados. Existen diferentes topologías de dichos convertidores. Cuando se selecciona una topología para una aplicación, se consideran varios factores, incluyendo la función básica

de conversión requerida; los dispositivos conmutados y sus características, circuitos conductores, control, protección, y pérdidas máximas de conmutación; y finalmente el costo, tamaño y peso. Las topologías básicas descritas en este documento son: convertidor elevador y convertidor reductor: el convertidor reductor proporciona un voltaje de salida menor que el de entrada, mientras que el convertidor elevador proporciona un voltaje de salida mayor que el de entrada [13].

Algunas de las aplicaciones de los convertidores son las siguientes: fuentes de alimentación de alta frecuencia, conversión de energía solar, convertidores cuasi-resonantes de alta frecuencia, vehículos y transmisión eléctrica, conversión de celdas de combustible en dispositivos de tracción, sistemas de energía distribuida, corrección de factor de potencia, relevador de estado sólido, etc [4].

2.1. Historia de la electrónica de potencia

Se inicia en 1900 con la introducción del rectificador de arco de mercurio. Después se introdujeron en forma gradual el rectificador de tanque metálico, el tubo de vacío controlado por una rejilla, el ignitrón, el fanotrón y el tiratrón. Estos dispositivos se aplicaban para el control de potencia hasta la década de 1950.

La primera revolución electrónica comenzó en 1948, con la invención del transistor de silicio en los Bell Telephone Laboratories, por Bardeen, Brattain y Shockley. La mayor parte de las tecnologías modernas de electrónica avanzada se pueden rastrear a partir de ese invento. La microelectrónica moderna ha evolucionado a través de los años a partir de los semiconductores de silicio. El siguiente adelanto, en 1956, también logrado en los Bell Laboratories, fue la invención del transistor de disparo PNP, que se definió como tiristor, o rectificador controlado de silicio (SCR).

La segunda revolución electrónica comenzó en 1958, con el desarrollo del tiristor comercial, por la General Electric Company. Fue el principio de una nueva era de la electrónica de potencia.

Desde entonces se han introducido distintas clases de dispositivos semiconductores de potencia y de técnicas de conversión. La revolución microelectrónica nos permitió tener la capacidad de procesar una cantidad gigantesca de información con una rapidez increíble. La revolución en la electrónica de potencia nos está permitiendo conformar y controlar grandes cantidades de potencia con una eficiencia siempre creciente. Debido al enlace entre

la electrónica de potencia, el músculo, con la microelectrónica, el cerebro, están surgiendo hoy muchas aplicaciones, y esa tendencia va a continuar. Dentro de los siguientes años, la electrónica de potencia conformará y acondicionará la electricidad en algún lugar de la red de transmisión entre su generación y todos los usuarios. La revolución de la electrónica de potencia ha adquirido impulso desde la década de 1980 principios de 1990 [25].

Desde que se desarrolló el primer tiristor a finales de 1957, ha habido progresos impresionantes en los dispositivos semiconductores de potencia. Hasta 1970, los tiristores convencionales se habían usado exclusivamente para el control de potencia en aplicaciones industriales. A partir de 1970 se desarrollaron varios tipos de dispositivos semiconductores de potencia que entraron al comercio. La Figura 2.1 muestra la clasificación de los semiconductores de potencia que se fabrican, ya sea de silicio o con carburo de silicio.

Sin embargo, los dispositivos de carburo de silicio todavía están en desarrollo, y la mayor parte de los dispositivos se fabrican con silicio. Estos dispositivos se pueden dividir en forma general en 3 partes: 1) diodos de potencia, 2) transistores y 3) tiristores. También se pueden dividir en general en cinco tipos: 1) diodos de potencia, 2) tiristores, 3) transistores de unión bipolar BJT , 4) MOSFET ¹, y 5) IGBT ² y SIT ³ [25].

A medida que se desarrolló la tecnología de los dispositivos semiconductores y circuitos integrados de potencia, se ensancha el potencial para las aplicaciones de la electrónica de potencia. Ya existen muchos dispositivos semiconductores que se consiguen en el comercio, y sin embargo continúa el desarrollo en esta dirección. Los convertidores por lo general son de seis categorías [25]:

- rectificadores
- convertidores CA/CD
- convertidores CA/CA
- convertidores CD/CD
- convertidores CD/CA
- interruptores estáticos

¹Transistores de Efecto de Campo de Oxido de Metal Semiconductor, de sus siglas en inglés *Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistors*

²Transistores Bipolares de Compuerta Aislada, de sus siglas en inglés *Insulated-Gate Bipolar Transistors*

³Transistores de Inducción Estática, de sus siglas en inglés *Static Induction Transistor*

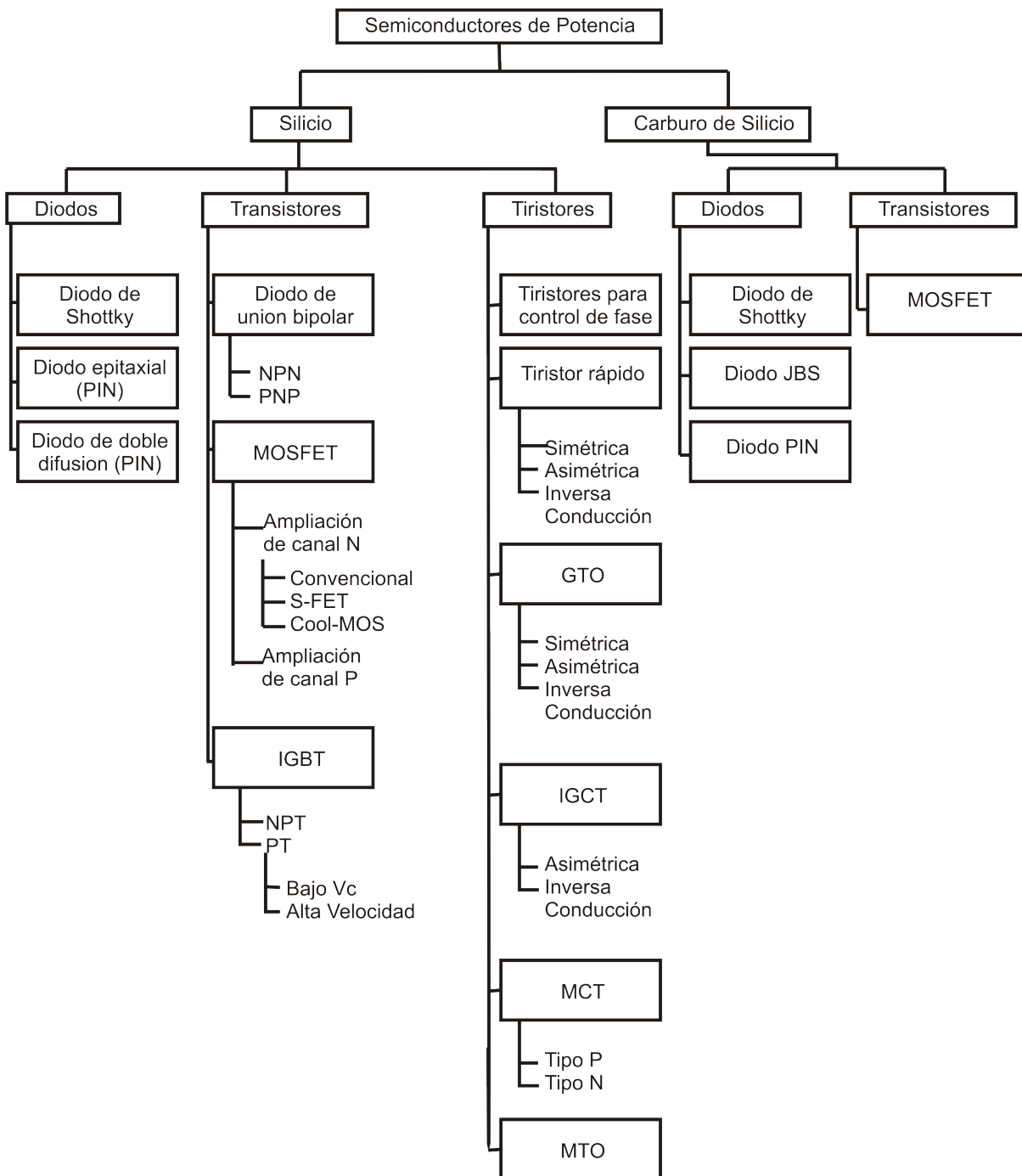


Figura 2.1: Clasificación de los semiconductores de potencia

2.2. Convertidores CD/CD

En muchas aplicaciones industriales se requiere convertir un voltaje fijo de una fuente de cd en un voltaje variable de suministro de cd. Un convertidor CD/CD convierte en forma directa de cd a cd y se llama simplemente convertidor de cd. Se puede considerar que un

convertidor cd es el equivalente en cd a un transformador de ca, con una relación de vueltas que varía en forma continua. Al igual que un transformador, se puede usar para subir o bajar el voltaje de una fuente [25].

Los convertidores CD/CD, o no disipativos, reciben este nombre porque en su realización se emplean dispositivos electrónicos que trabajan en conmutación. Se logra de esta forma que la energía disipada sea teóricamente nula, debido a que los dispositivos soportan voltaje sin dejar pasar corriente durante el estado de corte y dejan pasar corriente sin soportar voltaje durante el estado de conducción. En la práctica la disipación no es nula, debido principalmente a que en los componentes coexisten voltajes y corrientes apreciables durante las transiciones de un estado a otro.

Cuando estos convertidores se utilizan en aplicaciones en las que el nivel de potencia manejado es bajo, el elemento semiconductor principal es un transistor. Se suelen utilizar transistores bipolares para potencias de varios KW, con una frecuencia de conmutación inferior a 50 KHz, y transistores MOS⁴ para potencias máximas de unos pocos KW, con una frecuencia de trabajo superior a 50 KHz. En la actualidad se utilizan también IGBTs, en un rango intermedio entre el de los bipolares y los MOSFETs, por sus características híbridas entre ambos.

Una de las aplicaciones fundamentales de los convertidores CD/CD con transistores la constituyen las fuentes de alimentación conmutadas. Para dar una idea de su importancia, en la Tabla 2.1 se muestran datos estimados de la evolución del mercado de fuentes de alimentación en Estados Unidos y la inversión que este país realiza en este campo. Otro campo de aplicación es la realización de reguladores de alta frecuencia (10-200 KHz) [2].

Año	Dólares (Miles de millones)	Mercado(%)	
		Lineales	Conmutadas
1980	2.4	75	25
1986	4.5	40	60
1990	7	20	80
2000	15	10	90

Tabla 2.1: Volumen de mercado de fuentes lineales contra fuentes conmutadas en E.U.A.

Los convertidores CD/CD conmutados se pueden dividir en dos grandes categorías, de acuerdo con su principio de funcionamiento:

⁴Semiconductor de Metal de Oxido, de sus siglas en inglés *Metal Oxide Semiconductor*

- Controlados mediante PWM⁵
- Resonantes

A su vez, en cada una de estas categorías se pueden clasificar los convertidores atendiendo a su topología, es decir, a la forma en que se interconectan los elementos pasivos y los interruptores. En este capítulo se estudian las topologías de los convertidores CD/CD conmutados PWM reductor y elevador. La clasificación general de los convertidores CD/CD conmutados se muestra en la Figura 2.2.

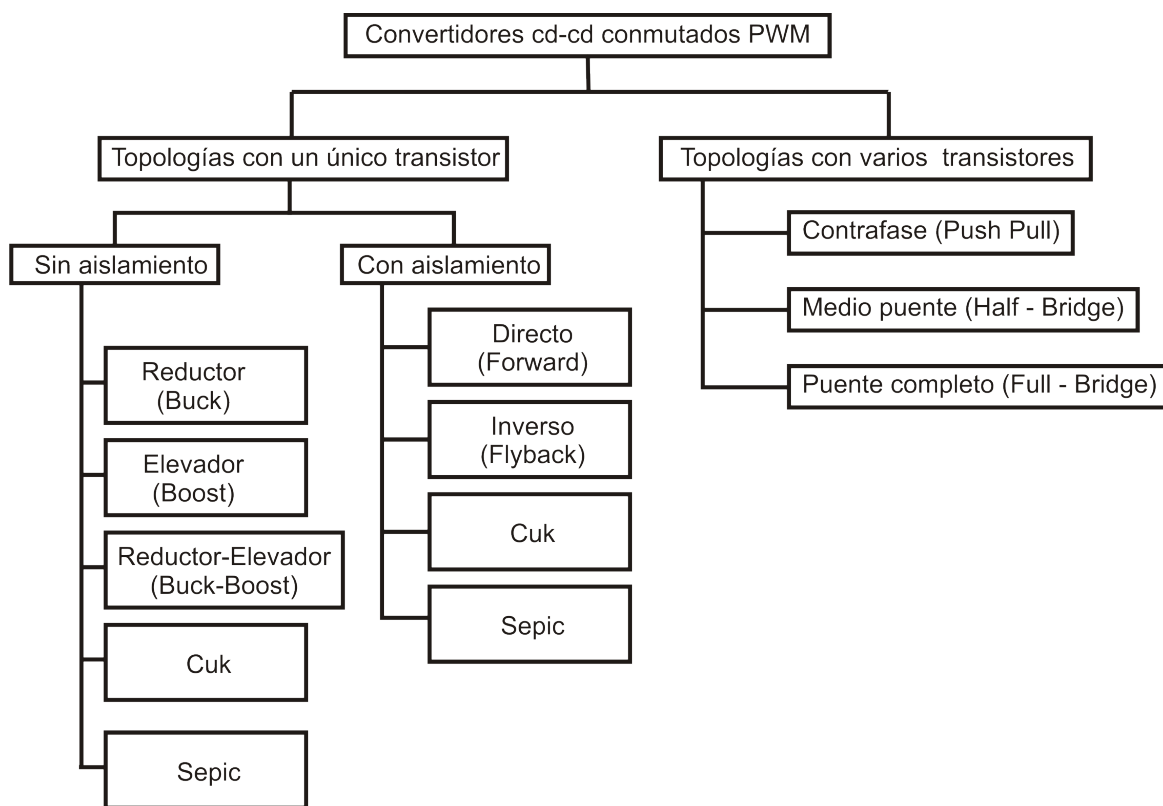


Figura 2.2: Clasificación de los convertidores CD/CD conmutados PWM

2.2.1. Topologías básicas con un único interruptor controlado

Su funcionamiento se basa en la conmutación de dos dispositivos: un transistor, con su circuito de control correspondiente, y un diodo, cuyo estado depende del que tiene el transistor. En el estudio de un convertidor CD/CD conmutado PWM, en el que el interruptor controlado se abre y se cierra periódicamente, se denomina t_{ON} al tiempo durante el

⁵Modulación por Ancho de Pulsos, de sus siglas en inglés *Pulse Width Modulation*

cual está cerrado y t_{OFF} al tiempo durante el cual está abierto. Se define el ciclo de trabajo (d) como la fracción del período durante la cual el interruptor está cerrado, por lo que se cumple que:

$$d = \frac{t_{ON}}{T} = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}}, t_{ON} = d \cdot T, t_{OFF} = (1 - d) \cdot T \quad (2.1)$$

En éste capítulo se estudia el comportamiento estático (en régimen permanente) de cada topología para determinar sus parámetros fundamentales, que son:

- La relación entre el voltaje de salida y de entrada, o relación de transformación.
- Los voltajes máximos y las corrientes máximas y medias soportadas por los distintos componentes y, en particular, por los dispositivos semiconductores.
- El rizado del voltaje de salida.

Para calcular la relación entre las distintas variables eléctricas se tiene en cuenta el comportamiento de los inductores y de los capacitores en régimen permanente (Figura 2.3).

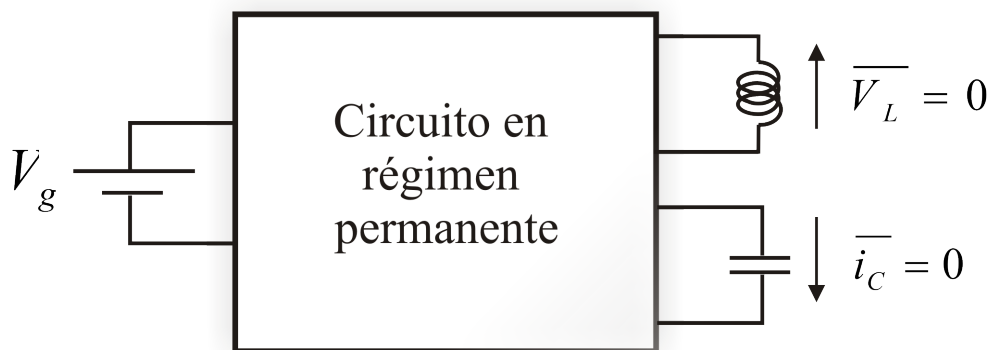


Figura 2.3: Inductores y capacitores en régimen permanente

En el caso del cálculo de la relación de transformación se tiene en cuenta las formas de onda en el inductor (Figura 2.4).

Este estudio se realiza en dos posibles modos de funcionamiento:

1. **Modo de conducción continuo**, en el que la corriente que circula a través del inductor no se anula en ningún momento del período de conmutación.

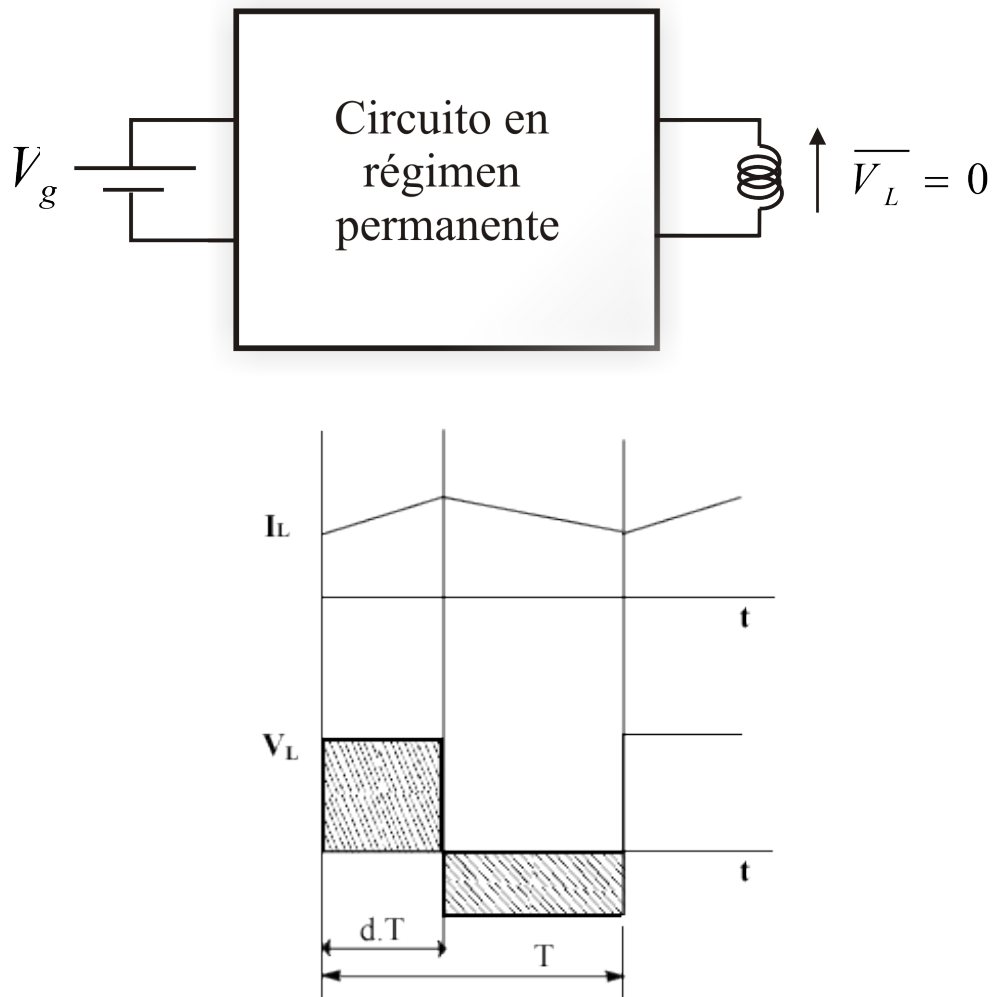


Figura 2.4: Formas de onda en el inductor

2. **Modo de conducción discontinuo**, en el que la corriente que circula a través del inductor se anula antes del fin del período de conmutación.

El modo de conducción del convertidor es debido a que el valor medio de la corriente a través del inductor ($\overline{i_L}$) depende del valor de la corriente de salida (i_o). En la Figura 2.5, se muestra la relación entre ambos valores cuando se incrementa la resistencia de carga.

Teniendo en cuenta que las pendientes de la corriente i_L no dependen de la corriente de salida sino del voltaje de entrada V_g y del voltaje de salida V_o , a medida que disminuye la corriente de salida el valor mínimo de la corriente por el inductor tiende a cero.

¿Qué ocurre cuando la resistencia de carga es mayor que el valor de la resistencia crítica (R_{crit})?. Si el convertidor es bidireccional seguirá funcionando en modo continuo pero, en caso contrario, entraría en modo de funcionamiento discontinuo (Figura 2.6).

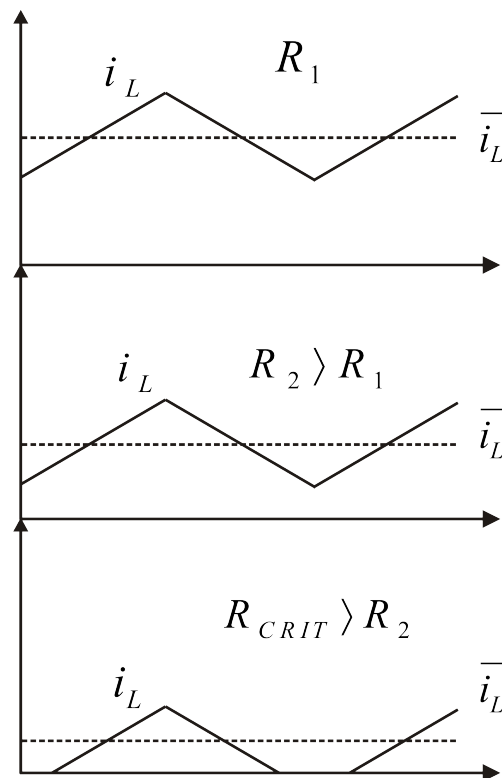


Figura 2.5: Relación entre la corriente de salida y el valor medio de la misma

Cuando se trabaja en modo discontinuo no existe parte negativa por lo que el valor medio de la corriente a través del inductor se incrementa y como consecuencia también lo harán la corriente y el voltaje de salida.

¿Qué parámetros del convertidor pueden influir en el modo de funcionamiento? En la Figura 2.7, se muestra el acercamiento a la situación crítica debido a la influencia de la inductancia, de la frecuencia de funcionamiento y del valor de la resistencia de carga.

El análisis de las topologías abordadas aquí, en ambos modos de conducción, se lleva a cabo de forma simplificada, a partir de un conjunto de aproximaciones, comunes para todas ellas:

- El voltaje de entrada es constante.
- Los dispositivos son ideales, por lo que su conmutación es instantánea y no hay disipación de potencia en el convertidor.
- El circuito de control mantiene constante el período de conmutación.
- El valor del capacitor es suficientemente grande para que se pueda considerar el voltaje

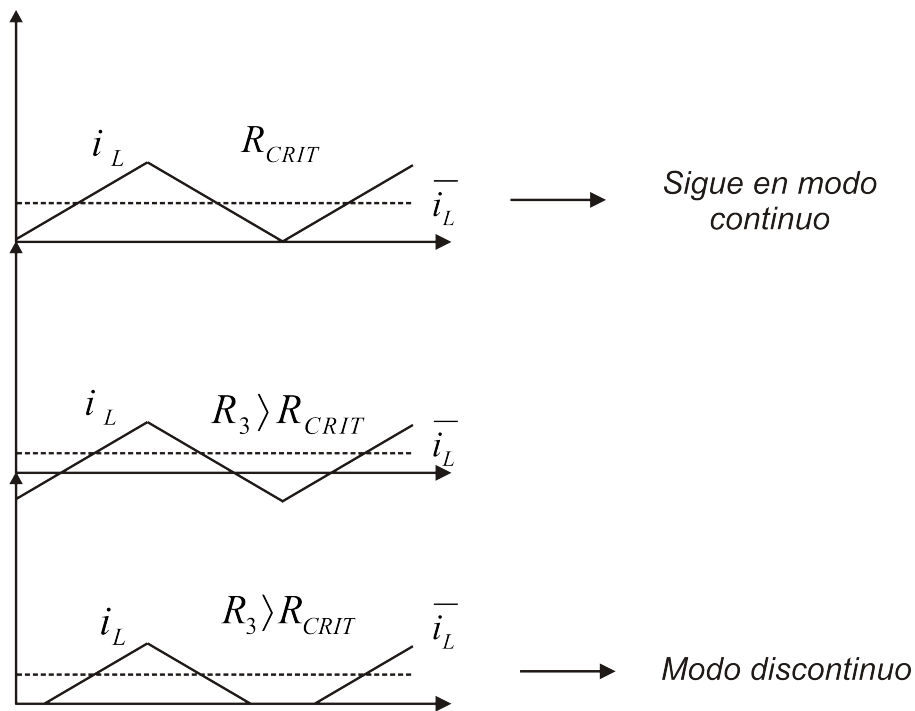


Figura 2.6: Modo de funcionamiento continuo y discontinuo

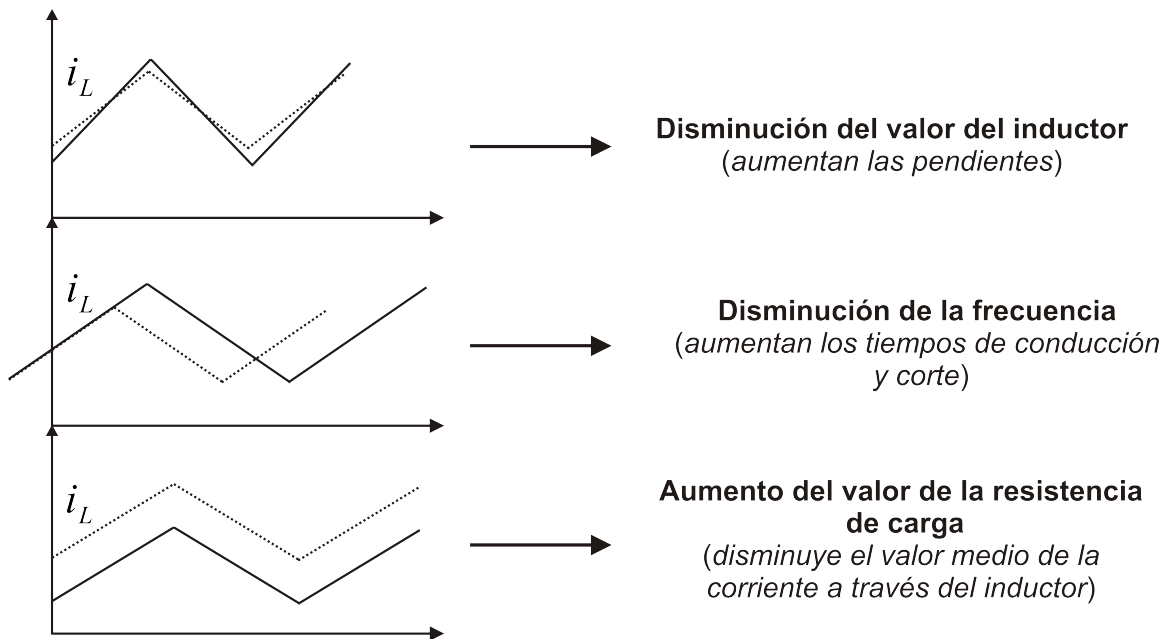


Figura 2.7: Parámetros que influyen en el modo de funcionamiento

en la carga constante (evidentemente, esta simplificación no se aplica en el cálculo del rizado del voltaje de salida).

- Los valores de los voltajes y corrientes máximas y de la relación de transformación se

calculan suponiendo ciertas condiciones iniciales en todos los elementos reactivos.

A continuación se estudian las topologías básicas de convertidores CD/CD sin aislamiento galvánico conmutados PWM con los que cuenta el SimEP y que poseen un único interruptor controlado. Dichas topologías son las siguientes:

- Convertidor reductor (buck converter).
- Convertidor elevador (boost converter).

2.2.2. Convertidor reductor

En la Figura 2.8 se muestra su estructura. Recibe el nombre de reductor porque proporciona un voltaje de salida menor que el de entrada.

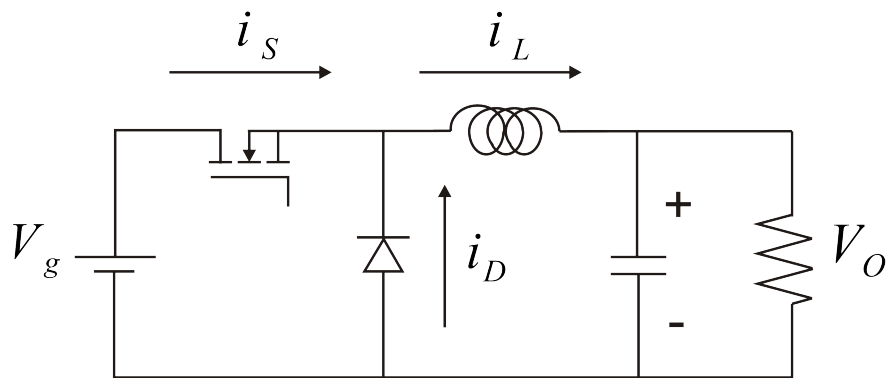


Figura 2.8: Estructura del convertidor reductor

Análisis en modo de conducción continuo

Para analizar este modo de funcionamiento, se utilizan los circuitos equivalentes de la Figura 2.9. Cuando el interruptor está cerrado, el diodo se polariza inversamente y la corriente fluye desde la fuente de entrada a través del interruptor y el inductor hacia el conjunto RC. Cuando el interruptor se abre, la corriente almacenada en forma de campo magnético en el inductor circula a través del diodo, polarizado directamente.

- Intervalo de conducción ($0 < t < t_{ON}$)

$$V_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (2.2)$$

$$\Delta i_L(t = T) = \frac{V_g - V_o}{L} \cdot d \cdot T \quad (2.3)$$

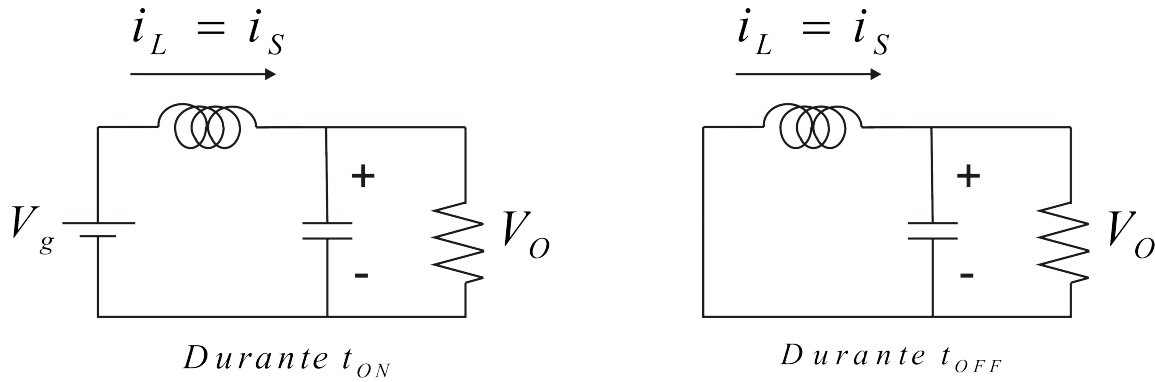


Figura 2.9: Modo de conducción continuo para el convertidor reductor

- Intervalo de corte ($t_{ON} < t < T$)

$$V_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (2.4)$$

$$\Delta i_L(t = T) = \frac{-V_o}{L} \cdot (1 - d) \cdot T \quad (2.5)$$

A partir de las expresiones obtenidas, y teniendo en cuenta el comportamiento del inductor en régimen permanente, se deduce la relación de transformación:

$$V_o = d \cdot V_g \quad (2.6)$$

Dado que $0 < d < 1$, el voltaje de salida es menor que la de entrada.

A continuación se deducen los valores máximo y mínimo de corriente a través del inductor, y el valor mínimo de la inductancia para asegurar el funcionamiento en modo continuo, teniendo en cuenta que, en régimen estacionario, la corriente media a través del capacitor es nula:

$$i_{Lmax} + i_{Lmin} = 2 \cdot V_o \cdot \frac{1}{R} \quad (2.7)$$

Además, anteriormente se obtuvo que:

$$\Delta i_L(t = t_{OFF}) = i_{Lmin} - i_{Lmax} = \frac{-V_o}{L} \cdot t_{OFF} \Rightarrow i_{Lmax} - i_{Lmin} = V_o \cdot \frac{1 - d}{L} \cdot T \quad (2.8)$$

Con ambas ecuaciones se deducen los valores máximos y mínimos de la corriente a través del inductor:

$$\begin{cases} i_{Lmax} = V_g \cdot d \cdot \left[\frac{1}{R} + \frac{1-d}{2L} \cdot T \right] \\ i_{Lmin} = V_g \cdot d \cdot \left[\frac{1}{R} - \frac{1-d}{2L} \cdot T \right] \end{cases} \quad (2.9)$$

Para el cálculo de la inductancia mínima que asegura el modo de funcionamiento continuo se iguala a cero el valor de la corriente i_{Lmin} , tal que:

$$L_{min} = \frac{R \cdot T}{2} \cdot (1 - d) \quad (2.10)$$

En la práctica no debe utilizarse nunca un inductor con este valor de inductancia límite, calculado teóricamente en condiciones ideales, sino uno de mayor inductancia. El rizado del voltaje de salida se calcula a partir de la forma de onda de la corriente a través del capacitor que se muestra en la Figura 2.10.

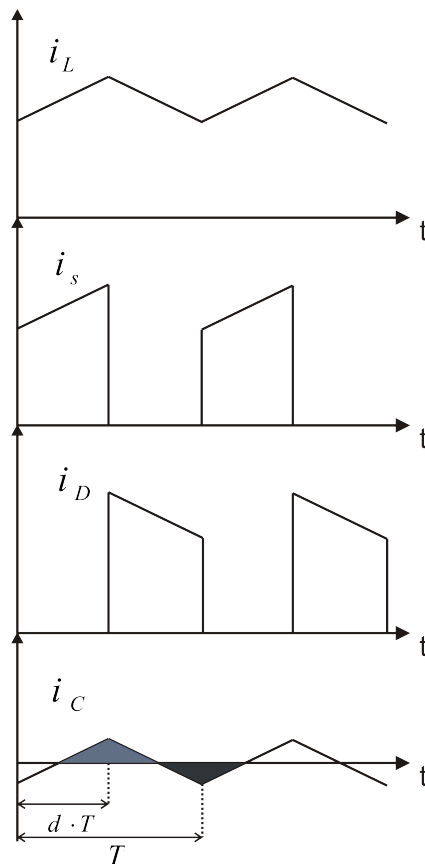


Figura 2.10: Formas de onda de corriente de los diferentes dispositivos

El capacitor se carga (almacena energía) durante el tiempo de encendido en el que la corriente a través del inductor es mayor que su valor medio (igual a la corriente de salida), y alcanza el máximo voltaje en el instante final del intervalo. De forma similar, se descarga durante el tiempo de corte en el que la corriente a través del inductor es menor que su valor medio, y alcanza el mínimo voltaje, que coincide con la que tenía cuando comenzó a cargarse, en el instante final del intervalo. Por lo tanto, la variación de carga en el capacitor es igual en cada uno de esos intervalos, y su valor es el de la integral de la corriente, es decir, el área de uno de los triángulos. Al tener áreas y alturas idénticas, las bases de ambos triángulos son iguales, y por lo tanto su valor es $\frac{T}{2}$. Por lo tanto, se tiene que:

$$\Delta Q_c = \frac{1}{2} \cdot \frac{T}{2} \cdot \frac{i_{Lmax} - i_{Lmin}}{2} = \frac{1}{8} \cdot \Delta i_L(t = t_{ON}) \cdot T \quad (2.11)$$

Por lo tanto, la expresión del rizado del voltaje de salida, definido como la máxima variación de voltaje en el capacitor, resulta:

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q_c}{C} = \frac{1}{8} \cdot \frac{\Delta i_L(t = t_{ON}) \cdot T}{C} = \frac{1}{8} \cdot \frac{V_o \cdot (1 - d) \cdot T^2}{L \cdot C} = \frac{1}{8} \cdot \frac{V_g \cdot d \cdot (1 - d) \cdot T^2}{L \cdot C} \quad (2.12)$$

Esta expresión permite calcular el valor de la capacitancia para garantizar un valor máximo de rizado del voltaje de salida, que es una condición de diseño:

$$C = \frac{1}{8} \cdot \frac{V_o}{\Delta V_o} \cdot \frac{(1 - d) \cdot T^2}{L} = \frac{1}{8} \cdot \frac{V_g \cdot d \cdot (1 - d) \cdot T^2}{\Delta V_o \cdot L} \quad (2.13)$$

Para la elección de los dispositivos semiconductores, se tiene en cuenta que ambos deben soportar un voltaje máximo igual al voltaje de entrada, y una corriente máxima igual a i_{Lmax} .

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{Smax} = V_{Dmax} = V_g \\ i_{Smax} = i_{Dmax} = i_{Lmax} = i_o + \frac{\Delta i_L}{2} \\ \bar{i}_S = i_S = i_o \cdot d \\ \bar{i}_D = i_D = i_o \cdot (1 - d) \end{array} \right. \quad (2.14)$$

Análisis en modo de conducción discontinuo

En este modo de funcionamiento, el convertidor pasa por tres estados en cada período de conmutación. Dos de ellos son idénticos a los estudiados en el modo de conducción continuo (interruptor cerrado e interruptor abierto con corriente a través del inductor no nula) y el tercero, cuyo circuito equivalente de se muestra en la siguiente figura, corresponde al intervalo durante el cual el interruptor está abierto y la corriente a través del inductor se anula (nunca puede ser negativa, porque el diodo lo impide).

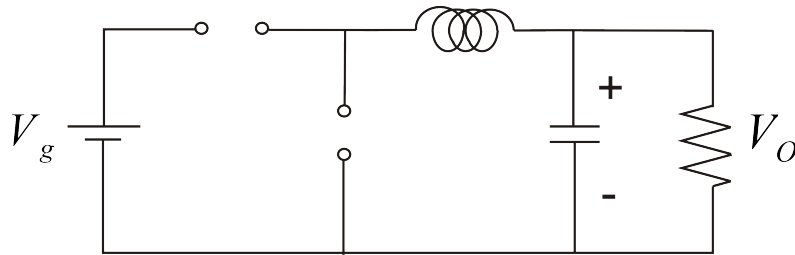


Figura 2.11: Modo de conducción discontinuo para el convertidor reductor

Para el análisis, se siguen razonamientos análogos a los utilizados en el caso de modo de conducción continuo:

- Intervalo ($0 < t < t_{ON}$)

$$\Delta i_L(ON) = i_L(t_{ON}) - i_L(0) = i_L(t_{ON}) = i_{Lmax} = \frac{V_g - V_o}{L} \cdot d \cdot T \quad (2.15)$$

- Intervalo ($t_{ON} < t < t(i_L = 0)$)

Este intervalo corresponde al tiempo transcurrido desde que se abre el interruptor hasta que la corriente a través del inductor se anula:

$$\Delta i_L(OFF) = -i_L(t_{ON}) = \frac{-V_s}{L} \cdot d' \cdot T \quad (2.16)$$

La relación de transformación se deduce inmediatamente a partir de las dos expresiones anteriores. Para obtener una expresión similar a la deducida para el modo de conducción continuo, se define el parámetro d' como la fracción del período de conmutación que corresponde al tiempo transcurrido desde la apertura del interruptor hasta el instante en que se anula la corriente a través del inductor, es decir, $t(i_L = 0) - t_{ON} = d' \cdot T$. Por lo tanto:

$$V_o = V_g \cdot \frac{d}{d + d'} \quad (2.17)$$

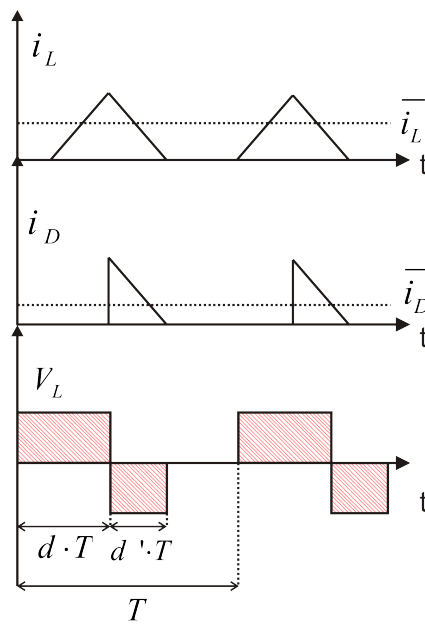


Figura 2.12: Formas de onda en modo de conducción discontinuo

A continuación se deduce la expresión de la relación de transformación en función únicamente de parámetros de diseño:

$$d' = \frac{-d + \sqrt{d^2 + \frac{8L}{R \cdot T}}}{2} \quad (2.18)$$

Si se define la relación de transformación como $M = \frac{V_o}{V_g}$ y denominado $k = \frac{2L}{R \cdot T}$, se tiene que:

$$M = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot k}{d^2}}} \quad (2.19)$$

La frontera entre ambos modos de conducción corresponde a un valor del parámetro k :

$$k = k_{crit} = 1 - d \Rightarrow k_{critmax} = 1 \quad (2.20)$$

Los valores correspondientes a los componentes del convertidor, teniendo en cuenta los resultados anteriores, serán:

$$C = \frac{\Delta Q_c}{\Delta V_o} = \frac{V_o}{\Delta V_o} \cdot \frac{T}{R} \cdot \left(1 - \frac{d+d'}{2}\right)^2 \quad (2.21)$$

$$(2.22)$$

$$L_{max} = \frac{R \cdot T}{2} \cdot (1 - d) \quad (2.23)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{Smax} = V_{Dmax} = V_g \\ i_{Smax} = i_{Dmax} = i_{Lmax} = \frac{V_o}{L} \cdot d' \cdot T \\ \overline{i_S} = i_S = \frac{V_o}{L} \cdot \frac{d \cdot d' \cdot T}{2} \\ \overline{i_D} = i_D = \frac{V_o}{L} \cdot \frac{d'^2 \cdot T}{2} \end{array} \right. \quad (2.24)$$

2.2.3. Convertidor elevador

En la siguiente figura se muestra su estructura. Recibe el nombre de elevador porque proporciona un voltaje de salida mayor que el de entrada.

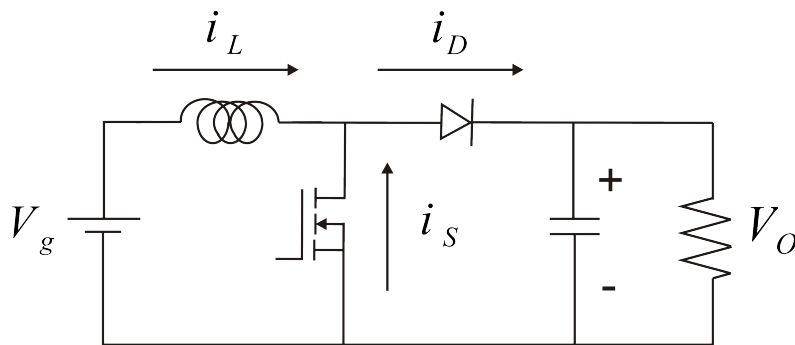


Figura 2.13: Estructura del convertidor elevador

Análisis en modo de conducción continuo

Para analizar este modo de funcionamiento, se utilizan los circuitos que se muestran en la Figura 2.14. Cuando el interruptor está cerrado la energía de entrada se almacena en el inductor y el diodo está polarizado inversamente, por lo que el capacitor alimenta a

la carga. Cuando el interruptor está abierto, la corriente almacenada en forma de campo magnético en el inductor circula a través del diodo (polarizado directamente) y del conjunto RC.

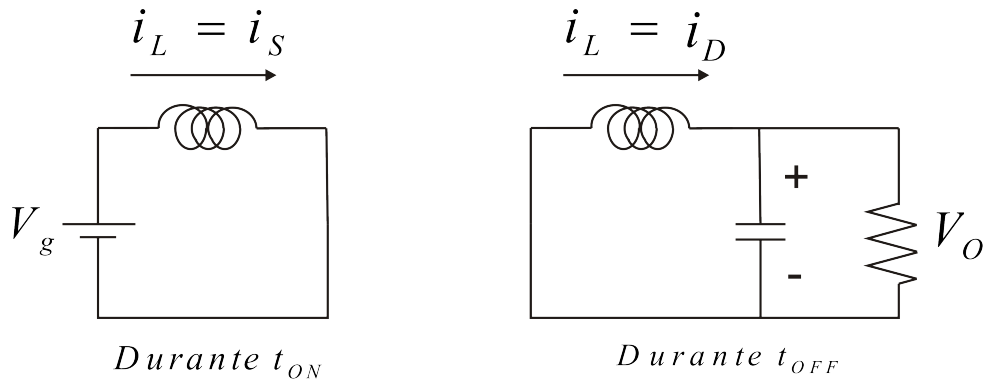


Figura 2.14: Modo de conducción continuo para el convertidor elevador

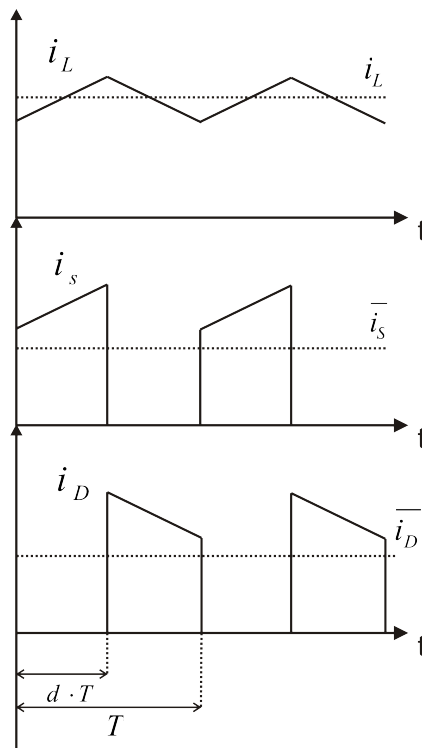


Figura 2.15: Formas de onda de corriente en los diferentes dispositivos

- Intervalo de conducción ($0 < t < t_{ON}$)

$$V_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (2.25)$$

$$\Delta i_L(t = t_{ON}) = \frac{V_g}{L} \cdot d \cdot T \quad (2.26)$$

- Intervalo de corte ($t_{ON} < t < T$)

$$V_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (2.27)$$

$$\Delta i_L(t = T) = \frac{V_g - V_o}{L} \cdot t_{OFF} = \frac{V_g - V_o}{L} \cdot (1 - d) \cdot T \quad (2.28)$$

A partir de las expresiones obtenidas, y teniendo en cuenta el comportamiento del inductor en régimen permanente, se deduce la relación de transformación:

$$V_o = \frac{V_g}{1 - d} \quad (2.29)$$

Dado que $0 < d < 1$, el voltaje de salida es mayor que el de entrada. En el caso del convertidor elevador es importante tener en cuenta que la resistencia parásita del inductor es un término significativo para valores elevados del ciclo de trabajo, lo que provoca una disminución del rendimiento. Por ello, en la práctica $0 < d < 0,5$.

A continuación se deducen los valores máximo y mínimo de corriente a través del inductor, y el valor mínimo de la inductancia para asegurar el funcionamiento en modo continuo, teniendo en cuenta que, en régimen estacionario, la corriente media a través del capacitor es nula:

$$\bar{i}_o = i_o = \frac{V_o}{R} = \bar{i}_D = i_D = \frac{i_{Lmax} + i_{Lmin}}{2} \cdot (1 - d) \quad (2.30)$$

Igualando ambas expresiones y expresando el voltaje de salida en función del voltaje de entrada:

$$\frac{i_{Lmax} + i_{Lmin}}{2} \cdot (1 - d) = \frac{V_g}{R \cdot (1 - d)} \Rightarrow i_{Lmax} + i_{Lmin} = 2 \cdot V_g \cdot \frac{1}{R \cdot (1 - d)^2} \quad (2.31)$$

Además, anteriormente se obtuvo que:

$$\Delta i_L(t = t_{ON}) = i_{Lmax} - i_{Lmin} = \frac{V_g}{L} \cdot d \cdot T \quad (2.32)$$

Con ambas ecuaciones se deducen los valores máximos y mínimos de la corriente a través del inductor:

$$\begin{cases} i_{Lmax} = V_g \cdot \left[\frac{1}{R \cdot (1-d)^2} + \frac{d \cdot T}{2L} \right] \\ i_{Lmin} = V_g \cdot \left[\frac{1}{R \cdot (1-d)^2} - \frac{d \cdot T}{2L} \right] \end{cases} \quad (2.33)$$

Para el cálculo de la inductancia mínima que asegura el modo de funcionamiento continuo se iguala a cero el valor de la corriente i_{Lmin} , tal que:

$$\frac{1}{R \cdot (1-d)^2} - \frac{d \cdot T}{2 \cdot L_{min}} = 0 \Rightarrow L_{min} = \frac{R \cdot T}{2} \cdot d \cdot (1-d)^2 \quad (2.34)$$

En la Figura 2.15 se muestran las formas de onda de corriente a través del capacitor. La representación de dos formas de onda responde a la existencia de dos posibilidades para la obtención de la relación entre la capacitancia y el rizado del voltaje de salida, que se analizan a continuación:

- $i_{Lmin} \geq i_o$

$$C = \frac{\Delta Q_c}{\Delta V_o} = \frac{V_o}{\Delta V_o} \cdot \frac{d \cdot T}{R} \quad (2.35)$$

- $i_{Lmin} < i_o$

$$C = \frac{\Delta Q_c}{\Delta V_o} = \frac{V_o}{\Delta V_o} \cdot \frac{d \cdot L}{2} \cdot \left[\frac{1}{R \cdot (1-d)} + \frac{(1-d) \cdot T}{2L} \right]^2 \quad (2.36)$$

El límite entre estas dos situaciones está determinado por la condición $i_{Lmin} = i_o$, es decir:

$$L_{min} = \frac{R \cdot T}{2} \cdot (1-d)^2 = \frac{L_{min}}{d} \quad (2.37)$$

Para la elección de los dispositivos semiconductores, se tiene en cuenta que ambos deben soportar un voltaje máximo igual al voltaje de salida, y una corriente máxima igual a i_{Lmax} . Si el valor de L es suficientemente grande, se puede realizar un cálculo aproximado:

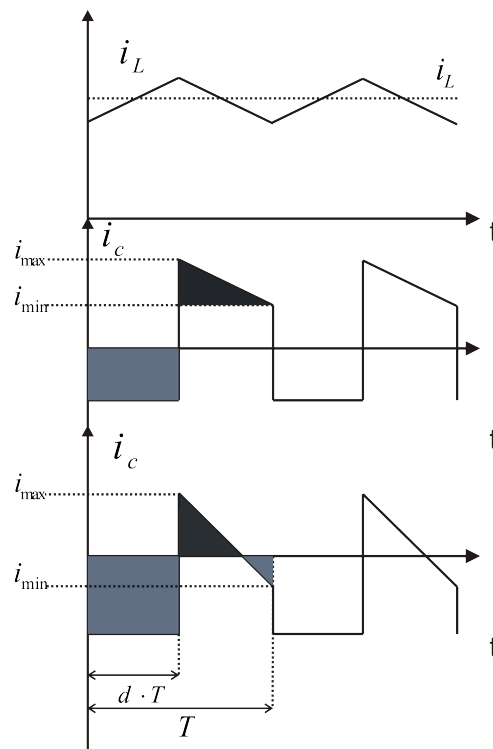


Figura 2.16: Formas de onda de corriente en el capacitor

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{Smax} = V_{Dmax} = V_o \\ i_{Smax} = i_{Dmax} = i_{Lmax} = \frac{i_o}{1-d} + \frac{\Delta i_L}{2} \\ \bar{i}_S = i_S = i_o \cdot \frac{d}{1-d} \\ \bar{i}_D = i_D = i_o \end{array} \right. \quad (2.38)$$

Análisis en modo de conducción discontinuo

En este modo de funcionamiento, el convertidor pasa por tres estados en cada período de conmutación. Dos de ellos son idénticos a los estudiados en el modo de conducción continuo (interruptor cerrado e interruptor abierto con corriente a través del inductor no nula) y el tercero corresponde al intervalo durante el cual el interruptor está abierto y la corriente a través del inductor se anula (nunca puede ser negativa, porque el diodo lo impide).

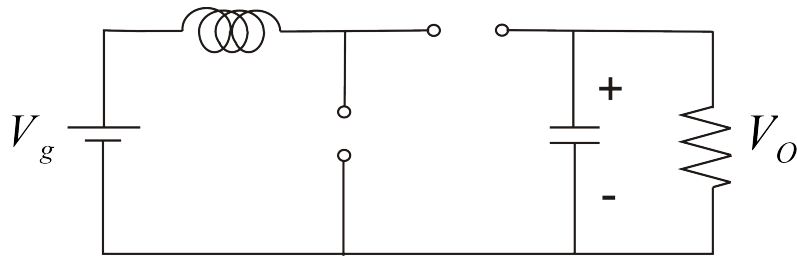


Figura 2.17: Modo de conducción discontinuo para el convertidor elevador

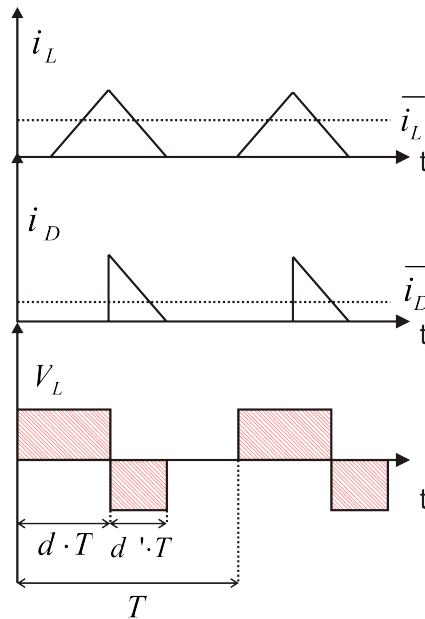


Figura 2.18: Formas de onda de corriente y voltaje

Para el análisis, se siguen razonamientos análogos a los utilizados en el caso de modo de conducción continuo:

- Intervalo ($0 < t \leq t_{ON}$)

$$\Delta i_L(t = d \cdot T) = i_{max} = \frac{V_g}{L} \cdot d \cdot T \quad (2.39)$$

- Intervalo ($d \cdot T < t < t(i_L = 0)$)

$$\Delta i_L(t = d' \cdot T) = -i_{Lmax} = \frac{V_g - V_o}{L} \cdot d' \cdot T \quad (2.40)$$

Y aplicando las condiciones de voltaje medio en el inductor en régimen permanente:

$$V_o = V_g \cdot \left[1 + \frac{d}{d'} \right] \quad (2.41)$$

A continuación se deduce la expresión de la relación de transformación en función únicamente de parámetros de diseño:

$$i_o = \frac{V_o}{R} = \frac{i_{Lmax}}{2} \cdot d' = \frac{V_g \cdot d \cdot T}{2 \cdot L} \cdot d' \Rightarrow d' = \frac{V_o}{V_g} \cdot \frac{2 \cdot L}{R \cdot d \cdot T} \quad (2.42)$$

Si se define la relación de transformación como $M = \frac{V_o}{V_g}$ y denominado $k = \frac{2L}{R \cdot T}$, se tiene que:

$$M = \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot d^2}{k}}}{2} \quad (2.43)$$

La frontera entre ambos modos de conducción corresponde a un valor del parámetro k :

$$k = k_{crit} = d \cdot (1 - d)^2 \Rightarrow k_{critmax} = \frac{4}{27} \quad (2.44)$$

Los valores correspondientes a los componentes del convertidor, teniendo en cuenta los resultados anteriores, serán:

$$C = \frac{\Delta Q_c}{\Delta V_o} = \frac{V_o}{\Delta V_o} \cdot \frac{T}{R} \cdot \left(1 - \frac{d'}{2}\right)^2 \cdot \frac{d + d'}{d'} \quad (2.45)$$

$$L_{max} = \frac{R \cdot T}{2} \cdot d \cdot (1 - d)^2 \quad (2.46)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{Smax} = V_{Dmax} = V_o \\ i_{Smax} = i_{Dmax} = i_{Lmax} = \frac{V_g}{L} \cdot d \cdot T \\ \overline{i_S} = i_S = \frac{V_g}{L} \cdot \frac{d^2 \cdot T}{2} \\ \overline{i_D} = i_D = \frac{V_g}{L} \cdot \frac{d \cdot d' \cdot T}{2} \end{array} \right. \quad (2.47)$$

2.2.4. Aplicaciones de los convertidores CD/CD

Estos convertidores se encuentran en muchas de las aplicaciones de sistemas de alto rendimiento, por ejemplo sistemas de tracción eléctrica, vehículos eléctricos y herramientas mecánicas. Los motores de cd con sus inductores e inercia mecánica actúan como filtros resultando en corrientes de alta calidad. El voltaje promedio de los convertidores es una función lineal de la variación del ciclo de trabajo. También son utilizados en sistemas de radar e ignición.

Los convertidores pueden ser modificados para operaciones de 2 y 4 cuadrantes. Los convertidores de 2 cuadrantes pueden ser parte de una fuente de poder autónoma que contiene paquetes de baterías y las cuales son fuentes de cd renovables tales como arreglos fotovoltaicos, celdas de poder o turbinas eólicas. Los de 4 cuadrantes son aplicados en conductores en los cuales el frenado regenerativo es requerido, por ejemplo, sistemas de transportación que requieren paradas frecuentes. Los convertidores con salidas inductivas sirven como entradas para inversores de conducción de corriente.

Los convertidores pueden ser vistos como transformadores de cd para liberar hacia la carga un voltaje o corriente de cd en un nivel diferente que la fuente de entrada. Esta transformación es mejorada por variación electrónica, no por electromagnética tal como en los transformadores convencionales. El rango de los voltajes de salida de los convertidores CD/CD van desde 1 V para circuitos VSLI⁶ hasta varios kilovolts en lámparas de rayos X. Los voltajes de salida más comunes son: 3.3 V para microprocesadores modernos; 5 y 12 V para circuitos lógicos; 48 V para equipos de comunicación; y 270 V para manejo de aviones o autobuses. Los voltajes de entrada típicos incluyen 48 V, 170 V, y 270 V.

La selección de una topología de convertidores CD/CD está determinada no solo por los voltajes de entrada/salida, los cuales pueden ser adicionalmente ajustados con la relación en los convertidores aislados, pero también por niveles de potencia, voltaje y corriente de los semiconductores, y la utilización de componentes magnéticos.

Los convertidores de CD/CD son utilizados para construir bloques de sistemas de alimentación distribuida en las cuales un conductor de voltaje cd común es convertido en varios otros voltajes. Tales sistemas son comunes en estaciones espaciales, barcos y aviones, también como equipo de comunicación y computadoras. Además, los sistemas de procesamiento de señales utilizan fuentes de alimentación variables para minimizar el consumo de energía y extender la vida útil de sus baterías. Los convertidores reductores de

⁶Integración a Gran Escala, de sus siglas en inglés *Very Large Scale Integration*

voltaje se utilizan en estas aplicaciones para arreglos de rectificación síncrona [24].

Las fuentes de poder conmutadas son otra de las aplicaciones de los convertidores cd, ya que son necesarias para sistemas analógicos y digitales. Dichas fuentes son diseñadas para cumplir con los siguientes requisitos:

- Salida regulada: El voltaje de salida debe ser constante para tolerar cambios en un rango de voltaje de entrada.
- Múltiples salidas: En sistemas que requieren tener multiples salidas de voltaje (positivo o negativo). Tales voltajes pueden estar aislados unos de otros.

Además de estos requerimientos, el objetivo común es reducir el tamaño de la fuente, el peso y proveer eficiencia. Tradicionalmente, se han utilizado las fuentes de alimentación lineales, sin embargo, los avances en la tecnología han llevado al uso de fuentes de alimentación conmutadas, las cuales son más pequeñas y eficientes comparadas con las fuentes lineales.

Los convertidores CD/CD también se aplican en los acondicionadores de energía, ya que éstos proveen una forma efectiva en la supresión de perturbaciones eléctricas. Algunos de estos acondicionadores son el óxido de metal que provee protección contra picos de voltaje lineal, filtros de interferencia magnética que ayudan a prevenir el corte en las formas de onda y eliminar el ruido en los dispositivos, transformadores ferresonantes que proveen regulación de voltaje y filtrado de ruido, transformadores aislados con protección electrostática que proveen no solo aislamiento galvánico, si no también filtrado de picos de voltaje.

Para alimentar a varias cargas críticas tales como computadoras usadas para controlar procesos importantes, equipo médico, entre otros, es necesario el uso de UPSs⁷. Estos dispositivos proveen protección contra cortes de energía, también como regulación de voltaje durante alta y baja tensión. También son excelentes en términos de supresión de líneas transitorias y armónicos.

Por último, los motores de cd que son utilizados en una amplia gama de aplicaciones, desde aquellas que requieren unos pocos watts hasta las que necesitan varios kilowatts para operar, en aplicaciones de mucha precisión, posicionamiento controlado de alto rendimiento y robots para manejo de ajuste de velocidad variable. En todos los dispositivos donde la posición y la velocidad son controladas, un convertidor electrónico de potencia es necesario

⁷Fuentes de Energía Ininterrumpidas, de sus siglas en inglés *Uninterruptible Power Supplies*

como una interfaz entre la energía de entrada y el motor. Además, los convertidores son extremadamente importantes en motores de cd que ordenan la posición y la velocidad [19].

Capítulo 3

Metodología de Desarrollo

3.1. Definición de la Interacción Humano-Computadora

Los avances en el hardware y el software han ayudado a resolver múltiples problemas de la vida cotidiana, incrementando con ello la cantidad de aplicaciones cada vez más complejas y específicas.

Uno de los cambios importantes en estos avances, fue el considerar al usuario final como parte importante durante el desarrollo del sistema, teniendo en cuenta de que a partir de él se podrán diseñar las interfaces y la forma de utilizar el software requerido de acuerdo a sus necesidades y requerimientos específicos [6].

De lo anterior, dio como resultado el concepto de HCI¹, denominado como un estudio donde el usuario es el principal actor en la etapa de desarrollo del sistema, con el objetivo principal de realizar las actividades del ser humano de una manera productiva y segura [12].

Durante mucho tiempo, los usuarios han expresado que las computadoras eran difíciles de utilizar, que solamente usuarios con conocimientos en el área de la informática y computación entendía su uso, pero la gran demanda de usuarios no expertos en el área, dió paso a buscar una solución a la manera de lograr la satisfacción para todos los usuarios inexpertos.

De acuerdo a lo anterior, se identificó la importancia del papel que desempeña el diseño de interfaces para el desarrollo de software, ya que una interfaz adecuada hace que el usuario se sienta cómodo y seguro al utilizar el sistema. Si el sistema no cuenta con

¹Interacción Humano-Computadora, de sus siglas en inglés *Human-Computer Interaction*

una interfaz que sea agradable al usuario, éste perderá interés en el mismo, y por lo tanto dejará de utilizarlo. Una interfaz pobre puede acarrear las siguientes consecuencias [21]:

- Incremento de errores en los datos de entrada y en las operaciones del sistema.
- Puede crear frustración en el usuario y provocar una baja productividad, producir estrés, y una mala utilización del sistema.
- Mayor tiempo de aprendizaje por parte del usuario para llegar a utilizar el sistema de manera eficiente.
- El usuario puede llegar a rechazar el sistema.

De acuerdo a la información anterior, se define a la Interacción Humano-Computadora como un estudio cuyo objetivo principal es facilitar al usuario el uso de las aplicaciones tanto de hardware como software, que le permitan utilizarlas de manera correcta y eficiente.

3.2. Justificación y selección del RUP

3.2.1. Comparación entre metodologías

Para el desarrollo de software existen diferentes metodologías, las cuales dan una secuencia de pasos a seguir para la realización del mismo. La Tabla 3.1 muestra las principales fortalezas y debilidades de las metodologías más utilizadas en el desarrollo de software. Cabe señalar que el objetivo de esta comparación no es la satisfacción del cliente. La satisfacción del cliente viene reflejada en el software, ya que los usuarios tienen poca o nula participación en el desarrollo del mismo [21].

Es por lo anterior, sin menospreciar dichas metodologías, se considera el modelo del RUP, debido a que este modelo reúne los elementos de todos los procesos genéricos, iteraciones de apoyo e ilustra buenas prácticas en la especificación y el diseño [27].

3.2.2. El Proceso Unificado Racional

RUP es un ejemplo de un modelo de proceso moderno que proviene del trabajo en UML y el asociado Proceso Unificado de Desarrollo de Software. El RUP se describe normalmente desde tres perspectivas [27]:

- Dinámica: muestra las fases del modelo sobre el tiempo.
- Estática: muestra las actividades del proceso que se presentan.
- Práctica: sugiere buenas prácticas a utilizar durante el proceso.

El RUP es un modelo que identifica cuatro fases diferentes en el proceso de software. Sin embargo, a diferencia del modelo en cascada donde las fases se equiparan con las actividades del proceso, las fases en el RUP están mucho más relacionadas con asuntos de negocio más que técnicos. Las fases del RUP son las siguientes [27]:

Inicio: El objetivo de esta fase es el de establecer un caso de negocio para el sistema. Se deben identificar todas las entidades externas (personas y sistemas) que interactúan con el sistema y definir esas interacciones. Esta información se utiliza para evaluar la aportación que el sistema hace al proyecto. Si esta aportación es de poca importancia, se puede cancelar el proyecto después de esta fase.

Elaboración: Los objetivos de esta fase de elaboración son desarrollar una comprensión del dominio del problema, establecer un marco de trabajo arquitectónico para el sistema, desarrollar el plan de proyecto e identificar los riesgos clave del proyecto. Al terminar esta fase, se debe tener un modelo de los requerimientos del sistema (se especifican los casos de uso UML), una descripción arquitectónica y un plan de desarrollo de software.

Construcción: La fase de construcción fundamentalmente comprende el diseño del sistema, la programación y pruebas. Durante esta fase se desarrollan e integran las partes del sistema. Al terminar esta fase, se debe tener un software operativo y la documentación correspondiente lista para ser entregada a los usuarios.

Transición: La fase final de RUP se ocupa de mover el sistema desde la comunidad de desarrollo a la del usuario y hacerlo trabajar en un entorno real. Esto se deja a un lado en la mayor parte de los modelos de procesos de software pero es, en realidad, una actividad de alto costo y a veces problemática. Al terminar esta fase, se debe tener un sistema que funciona correctamente en su entorno operativo.

La interacción del RUP se muestra en la Figura 3.1, la vista estática del RUP se centra en las actividades que tienen lugar durante el proceso de desarrollo. Éstas se denominan *flujos de trabajo* en la descripción del RUP. Existen seis principales flujos de trabajo del proceso identificados y tres principales flujos de trabajo de soporte. El RUP se ha diseñado conjuntamente con UML, por lo que la descripción del flujo de trabajo se orienta alrededor de los modelos UML asociados. En la Tabla 3.2 se describen los principales flujos de trabajo de ingeniería y soporte [27].

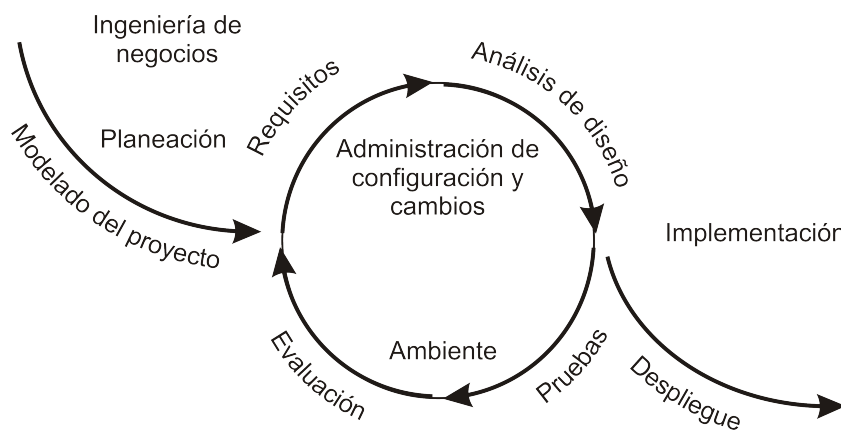


Figura 3.1: Flujos de trabajo del RUP

La ventaja de presentar perspectivas dinámicas y estáticas es que las fases del proceso de desarrollo no están asociadas con flujos de trabajo específicos. Al menos en principio, todos los flujos de trabajo del RUP pueden estar activos en todas las etapas del proceso. La mayor parte del esfuerzo se realizará en flujos de trabajo tales como el modelado del proyecto y los requerimientos en las primeras fases del proceso y en las pruebas y despliegue en las fases posteriores [22].

La perspectiva práctica en el RUP describe buenas prácticas de ingeniería del software que son aconsejables en el desarrollo de sistemas. Se recomiendan seis buenas prácticas fundamentales:

1. *Desarrollar el software de forma iterativa.* Planificar incrementos del sistema basado en las prioridades del usuario y desarrollo y entregar las características del sistema de más alta prioridad al inicio del proceso de desarrollo.
2. *Gestionar los requerimientos.* Documentar explícitamente los requerimientos del cliente y mantenerse al tanto de los cambios de estos requerimientos. Analizar el impacto de los cambios en el sistema antes de ser aceptado.

3. *Utilizar arquitecturas basadas en componentes.* Estructurar la arquitectura del sistema en componentes.
4. *Modelar el software visualmente.* Utilizar modelos gráficos UML para presentar vistas estáticas y dinámicas del software.
5. *Verificar la calidad del software.* Asegurar que el software cumple los estándares de calidad organizacionales.
6. *Controlar los cambios del software.* Gestionar los cambios del software usando un sistema de gestión de cambios y procedimientos y herramientas de gestión de configuraciones.

El RUP no es un proceso apropiado para todos los tipos de desarrollo sino que representa una nueva generación de procesos genéricos. Las innovaciones más importantes son la separación de fases y los flujos de trabajo, y el reconocimiento de que la utilización del software en un entorno del usuario es parte del proceso. Las fases son dinámicas y tienen objetivos. Los flujos de trabajo son estáticos y son actividades técnicas que no están asociadas con las fases únicas sino que pueden utilizarse durante el desarrollo para alcanzar los objetivos de cada fase [27].

Modelo de ciclo de vida	Fortalezas	Debilidades
Construir y arreglar	Bueno para programas que no requieren mantenimiento.	Totalmente insatisfactorio para programas importantes.
Cascada	Método disciplinado. Llevado por la documentación.	El producto entregado puede no cumplir las necesidades del cliente.
Prototipos rápidos	Se asegura que el producto entregado cumple con las especificaciones del cliente.	Aún no ha sido probado más allá de cualquier duda.
Incremental	Maximiza el retorno de la inversión. Promueve el mantenimiento.	Requiere una arquitectura abierta. Puede degenerar en un modelo de construir y arreglar.
Programación extrema	Trabaja bien cuando los requerimientos del cliente son vagos	Aún no ha sido usado ampliamente.
Sincronizar y estabilizar	Las necesidades futuras del cliente se satisfacen.	No ha sido usado ampliamente más que por Microsoft.
Espiral	Incorpora las características de todos los modelos anteriores.	Los desarrolladores tienen que ser competentes en el análisis y resolución de riesgos.
Diseño centrado al usuario	Involucra al usuario durante el desarrollo de su software.	No ha sido ampliamente usado.
Proceso Unificado de Rational	Las fases del desarrollo no están asociadas con flujo de trabajo específico.	Basado mucho en la documentación.

Tabla 3.1: Comparación entre las metodologías de desarrollo de software

Modelado del Proyecto	Los procesos de proyecto se modelan utilizando casos de uso de proyecto.
Requisitos	Se definen los actores que interactúan con el sistema y se desarrollan casos de uso para modelar los requerimientos del sistema.
Análisis y diseño	Se crea y documenta un modelo del diseño utilizando modelos arquitectónicos, modelos de componentes, modelos de objetos y modelos de secuencias.
Implementación	Se implementan y estructuran en subsistemas los componentes del sistema. La generación automática de código de los modelos de diseño ayuda a acelerar este proceso.
Pruebas	Las pruebas son un proceso iterativo que se llevan a cabo conjuntamente con la implementación. A la finalización de la implementación tiene lugar las pruebas del sistema.
Despliegue	Se crea una liberación del producto, se distribuye a los usuarios y se instala en su lugar de trabajo.
Configuración y cambios de gestión	Este flujo de trabajo de soporte gestiona los cambios del sistema.
Evaluación	Este flujo de trabajo de soporte gestiona el desarrollo del sistema
Ambiente	Este flujo de trabajo se refiere a hacer herramientas de software apropiadas disponible para los equipos de desarrollo de software

Tabla 3.2: Flujos de trabajo estáticos en el RUP

Capítulo 4

Desarrollo de la aplicación SimEP

Este capítulo describe el desarrollo del SimEP con base a los flujos de trabajo del RUP y el UML para su modelado.

4.1. Planeación inicial

4.1.1. Herramientas de software involucradas

Las herramientas utilizadas para desarrollar este trabajo de tesis fueron las siguientes. La plataforma utilizada para desarrollar el sistema fue Microsoft Windows, en versión XP Profesional. Existen varias razones por las cuales se ha decidido utilizarlo, siendo una de ellas que esta versión es utilizada por los lenguajes de programación que se utilizaron para desarrollar el software educativo.

Para las animaciones, se ha hecho un análisis de los lenguajes o programas de diseño a utilizar que pueden brindar una solución óptima a los requerimientos del sistema. Para esto, se requería principalmente que la aplicación fuera interactiva, además de contener imágenes ricas en movimiento y con colores llamativos, ya que la mayoría de la información se obtiene a través del canal visual. Por tal motivo se decidió ocupar el software para desarrollo multimedia de Macromedia, Flash, en su versión 8.

El desarrollo del sistema se ha programado con el lenguaje de programación ActionScript en su versión 2.0, el cual es un lenguaje de programación orientado a objetos. La principal razón es que este lenguaje está integrado en el software Multimedia Flash.

Además, para la realización de este documento, se utilizó el software TexnicCenter en su versión 1 Beta 7.01, así como el software MiKTeX 2.5 y el JabRef 2.1.

4.2. Requisitos del SimEP

El objetivo de los requisitos del sistema es obtener una descripción clara y precisa de lo que el sistema debe realizar, así como también delimitar su alcance.

Los requisitos del sistema son una de las partes importantes durante el ciclo de vida del desarrollo de software. Respecto a las fases de RUP: en la fase de inicio se identifica la mayoría de los casos de uso para delimitar el sistema y detallar los más importantes; en la fase de elaboración se planifican las tareas que se van a realizar para la elaboración del sistema y se obtiene el resto de los casos de uso; en caso que se detecten mas casos de uso, éstos se capturan e implementan en la fase de construcción; finalmente en la fase de transición se capturan mas requisitos y se modifican los casos de uso si es necesario [16].

4.2.1. Actores y casos de uso

Esta actividad es la encargada de delimitar el sistema y su principal objetivo es establecer los actores que interactúan con el sistema y cuál será su funcionalidad, mediante casos de uso. El SimEP proporciona las siguientes funciones:

- Mostrar marco teórico
- Mostrar simulador
- Realizar examen
- Evaluar examen
- Interfaz con instrumentos (Esta etapa no se contempla en el sistema)

Cabe destacar que solo existe un actor, el usuario, encargado de manipular la aplicación. La Figura 4.1 muestra a detalle la relación existente entre los casos de uso.

4.2.2. Función de los casos de uso del SimEP

A continuación se describe la función que desempeña cada caso de uso:

- *Marco teórico*: Muestra las bases teóricas, las ecuaciones y las principales características del convertidor seleccionado por el usuario.

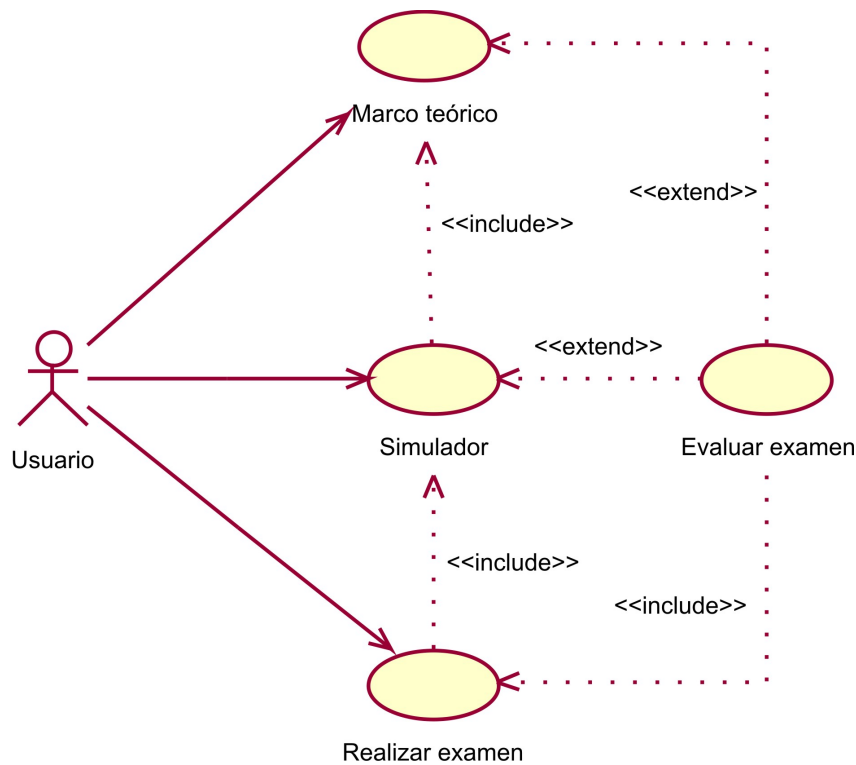


Figura 4.1: Diagrama general de los casos de uso del SimEP

- *Simulador*: Muestra una interfaz gráfica donde el usuario puede configurar el convertidor seleccionado y visualizar su comportamiento.
- *Realizar examen*: Despliega al usuario una serie de preguntas con posibles respuestas de acuerdo al convertidor estudiado previamente.
- *Evaluar examen*: Analiza las respuestas dadas por el usuario y determina el resultado del examen.
- *Interfaz con instrumentos*: En caso de que el resultado de la evaluación sea aprobatorio, se pasa a una nueva etapa que no se contempla en este sistema.

4.3. Análisis y diseño

Durante el análisis y diseño del SimEP se transformó el modelo de casos de uso en un modelo de diseño con la finalidad de economizar la implementación de los casos de uso, asegurar que el sistema ofrezca un rendimiento adecuado y pueda evolucionar en el futuro.

4.3.1. Análisis

En esta etapa se analizan los requisitos, se refinan y se estructuran con la finalidad de comprenderlos y describirlos para facilitar el mantenimiento y construcción de la arquitectura del sistema de software. Se puede utilizar un lenguaje formal para señalar detalles relativos a los requisitos del sistema (en RUP se conoce como refinar los requisitos), lo cual ayuda a una fácil comprensión, preparación, modificación y en general al mantenimiento de los requisitos. El propósito fundamental del análisis es resolver los requisitos o casos de uso con mayor profundidad, pero a diferencia de la captura de requisitos, se utiliza el lenguaje de los desarrolladores para describir los resultados [16].

Análisis de arquitectura

Durante el análisis se lleva a cabo una identificación inicial de los paquetes generales en los que se puede dividir el sistema; éstos se modifican y refinan en la etapa de diseño. Primero se tiene el modelo de capas:

- *Capa de presentación:* Este paquete puede contener todas las clases relacionadas con la interfaz de usuario, por ejemplo: la ventana de bienvenida del SimEP y la interfaz del simulador.
- *Capa de reglas de negocio:* Este paquete contiene todas aquellas clases que controlan las funciones del sistema, por ejemplo la clase que se encarga de realizar la simulación del convertidor seleccionado.

4.3.2. Diseño

En esta etapa se modela el sistema y se da forma, incluida la arquitectura, para que soporte todos los requisitos y otras restricciones; para ello los propósitos de esta etapa son [15]:

- Comprender los aspectos relacionados con los requisitos y las restricciones respecto a lenguajes de programación, sistemas operativos, tecnologías de distribución y concurrencia, tecnologías de interfaz de usuario, etc.
- Crear una entrada apropiada y un punto de partida para las actividades de implementación subsiguientes mediante la captura de los requisitos o subsistemas individuales, interfaces y clases.

- Descomponer los trabajos de implementación en partes más manejables que puedan ser llevadas a cabo por diferentes equipos de desarrollo, considerando la posible concurrencia. Lo anterior es útil en los casos en los que no es posible realizar la descomposición basándose en los resultados de la captura de requisitos (incluyendo el modelo de casos de uso) o análisis (incluyendo en modelo de análisis).

Una vez refinado el análisis se obtienen los siguientes artefactos:

- *Modelo de diseño*: Describe la realización física de los casos de uso, los cuales se realizan por las clases de diseño y sus objetivos, y se representan mediante realizaciones de casos de uso de diseño.
- *Realización de casos de uso*: Colaboración dentro del modelo de análisis que describe cómo se realiza un caso de estudio específico y cómo se ejecuta en términos de la clase de diseño y sus objetos.
- *Clases de diseño*: Son una abstracción similar de una clase o construcción en la implementación del sistema, es decir, el lenguaje utilizado debe ser el mismo que el lenguaje de programación a utilizar. Contiene también la visibilidad de los atributos, la cual puede ser pública, privada o protegida.
- *Paquetes de diseño*: Se encargan de organizar los artefactos del diseño en piezas manejables.

Diseño de la arquitectura y los subsistemas

La finalidad de esta actividad es expresar el modelo de diseño y la arquitectura mediante la identificación de subsistemas y sus interfaces, así como las clases de diseño.

Diseño de casos de uso

El diseño de los casos de uso permite identificar las clases de diseño describiendo su comportamiento mediante paquetes, interfaces y clases de diseño. Con la identificación de las clases de diseño se refinaron los casos de uso, para ello se estudió cada una de las clases de análisis que participan en la realización de los casos de uso. Una vez que se identificaron y realizaron las clases de diseño, se describe cómo interactúa con sus objetos correspondientes.

Se identifican las clases de análisis asignándoles un estereotipo y se describe el comportamiento de un caso mediante clases de análisis, para lo cual se utilizan los diagramas de

colaboración y se generan las realizaciones de los casos de uso. Una clase es una descripción de un conjunto de objetos que comparten los mismos atributos, operaciones y semántica [20].

Diseño de clases

El objetivo de diseñar una clase es cumplir su propósito en las realizaciones de los casos de uso y sus requisitos, esto significa que al llegar a esta etapa del modelado se debe contar con clases listas para ser codificadas en un lenguaje de programación. El diagrama de clases muestra todas las clases que serán utilizadas en la implementación de la aplicación, cada una de las clases cuenta con sus propios atributos y operaciones [16].

- Los atributos se deben definir utilizando la sintaxis del lenguaje de programación en el que se va a implementar, lo cual incluye especificar el tipo de datos del atributo y la visibilidad de cada atributo.
- Las operaciones, al igual que los atributos, se deben definir y describir utilizando la sintaxis del lenguaje de programación en el que se va a implementar, esto incluye especificar los parámetros con tipo y valores por omisión, el tipo de valor de retorno y la visibilidad de cada operación (*public*, *private* y *protected*)

4.3.3. Especificación de Casos de Uso

Especificación del caso de uso marco teórico

En este caso de uso, el usuario puede visualizar la información correspondiente del convertidor seleccionado. Cuando este caso inicia, se muestra al usuario el circuito característico del convertidor y el análisis matemático del mismo, posteriormente se muestra una serie de gráficos y animaciones en sus dos modos de funcionamiento: continuo y discontinuo. El objetivo de este caso es mostrar las bases teóricas, el funcionamiento y las principales características del convertidor elegido por el usuario. La Tabla 4.1 muestra el historial de revisiones y la Tabla 4.2 el flujo básico del caso de uso marco teórico.

Las Figuras 4.2 - 4.5 muestran los diagramas de clases, secuencia, actividades y colaboración del caso de uso marco teórico.

Fecha	Versión	Descripción	Autor
10/Septiembre/2007	1.0	Creación del documento	Edilberto S. M. C.
11/Septiembre/2007	1.1	Primeros diagramas	Edilberto S. M. C.
20/Mayo/2008	1.2	Terminación del documento	Edilberto S. M. C.

Tabla 4.1: Historial de revisiones del caso de uso marco teórico

Actor	Sistema
1.- El caso de uso inicia cuando el usuario selecciona uno de los convertidores mostrados por el SimEP en el menú de bienvenida	2.- El SimEP muestra la información teórica del convertidor seleccionado por el usuario, la cual consiste en texto, gráficos y animaciones.
3.- El usuario navega a través de la información presentada por el sistema.	4.- Al terminar de mostrar toda la información, se despliega en pantalla la opción para acceder a la etapa de simulación
4.- El usuario puede revisar todas las diapositivas cuantas veces sea necesario	
5. Finaliza el caso de uso marco teórico	

Tabla 4.2: Flujo básico del caso de uso marco teórico

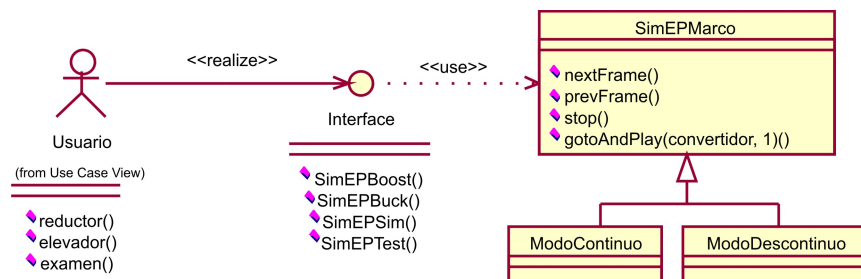


Figura 4.2: Diagrama de clases para el caso de uso marco teórico

Especificación del caso de uso simulador

En este caso de uso, el usuario puede visualizar el comportamiento de cada uno de los elementos (diodo, resistencia, capacitor, etc.) que integran al convertidor seleccionado. Cuando este caso inicia, el sistema muestra una interfaz donde el usuario puede seleccionar la señal de salida (voltaje o corriente) de los elementos que desea visualizar. Además de un módulo donde el usuario puede variar el valor de los elementos del convertidor seleccionado.

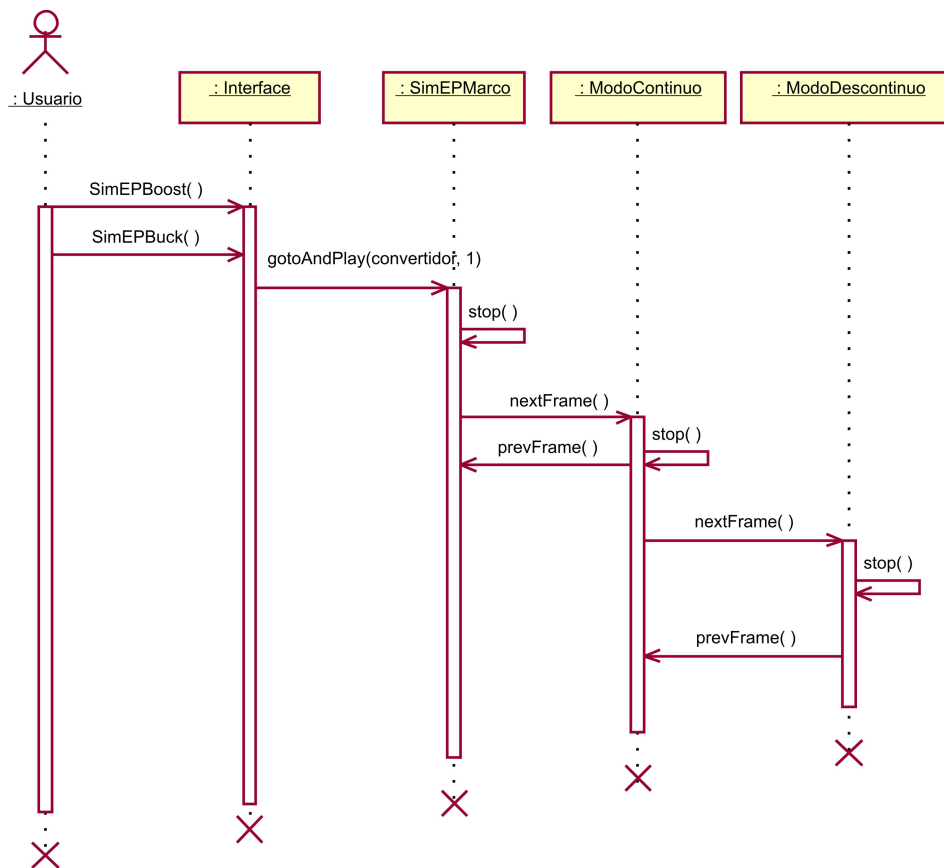


Figura 4.3: Diagrama de secuencia para el caso de uso marco teórico

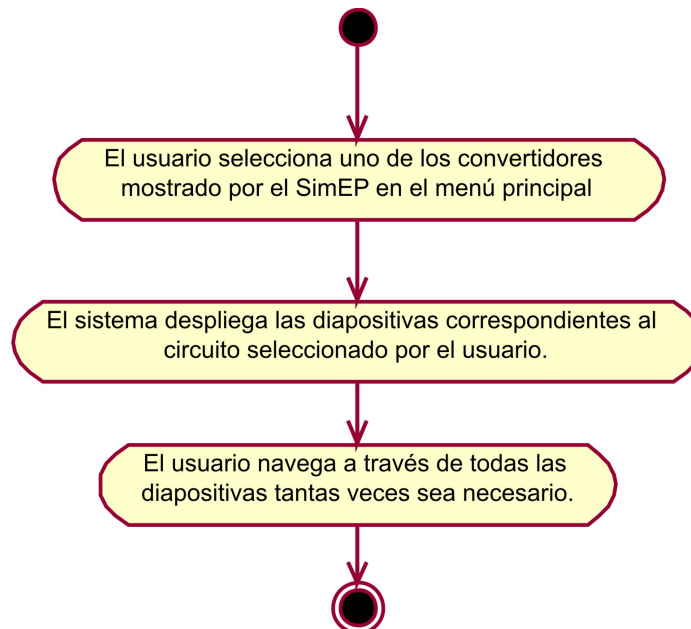


Figura 4.4: Diagrama de actividades para el caso de uso marco teórico

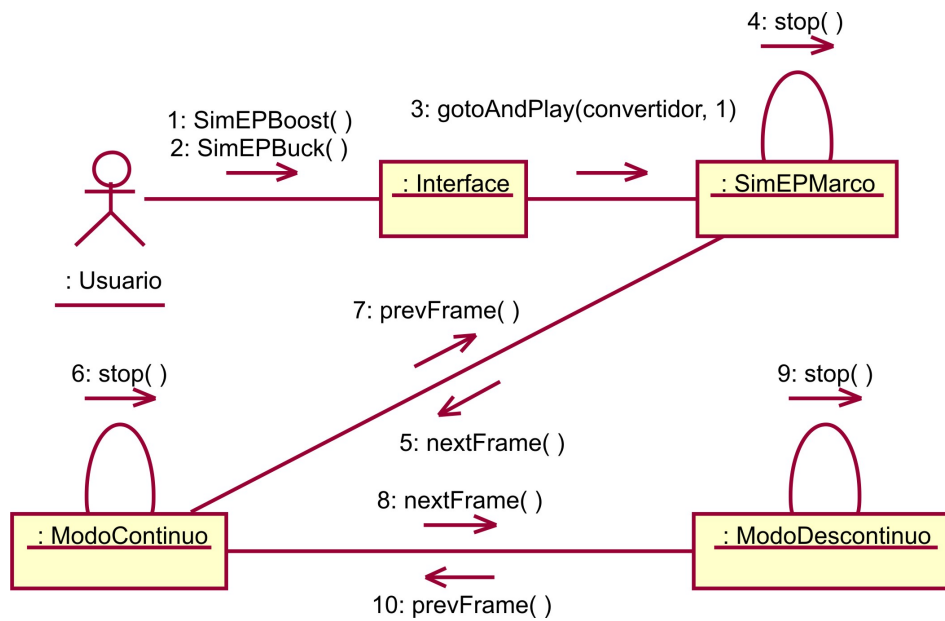


Figura 4.5: Diagrama de colaboración para el caso de uso marco teórico

Cuando el usuario realiza cualquiera de las operaciones mencionadas, el sistema dispara un evento y verifica la operación realizada, mostrando así la información en tiempo real. El objetivo de este caso es mostrar en forma interactiva el comportamiento de las señales de salida del convertidor de acuerdo al valor dado de los elementos que lo componen, así también para mostrar la diferencia entre los diferentes modos de conducción y las diferencias entre sus respectivas señales de salida. La Tabla 4.3 muestra el historial de revisiones y la Tabla 4.4 el flujo básico del caso de uso marco teórico.

De acuerdo a los valores de los dispositivos dados por el usuario, si los resultados de las operaciones realizadas por el SimEP son indeterminadas o infinitas el sistema no podrá graficar la señal correspondiente y los resultados numéricos arrojarán el mensaje "Nan". Las Figuras 4.6 - 4.9 muestran los diagramas de secuencia, colaboración, actividades y de clases del caso de uso simulador.

Fecha	Versión	Descripción	Autor
10/Septiembre/2007	1.0	Creación del documento	Edilberto S. M. C.
03/Marzo/2008	1.1	Primeros diagramas	Edilberto S. M. C.
20/Mayo/2008	1.2	Terminación del documento	Edilberto S. M. C.

Tabla 4.3: Historial de revisiones del caso de uso simulador

Actor	Sistema
1.- El usuario selecciona la opción simulador	2.- El SimEP inicializa los valores globales y carga la interfaz correspondiente al simulador, la cual consiste en un cuadro de diálogo de los dispositivos del convertidor que se desea visualizar
	3.- El SimEP espera a que el usuario realice una operación
4.- El usuario selecciona el dispositivo y la señal de salida que desea visualizar, modifica el valor de los dispositivos	5.- El SimEP identifica las operaciones realizadas por el usuario y procede a realizar los cálculos necesarios para mostrar en pantalla la gráfica de la señal de salida y los resultados matemáticos
	6.-El SimEP despliega en pantalla los resultados
7.- El usuario realiza las operaciones tantas veces sea necesario	
8.- Finaliza el caso de uso simulador	

Tabla 4.4: Flujo básico del caso de uso simulador

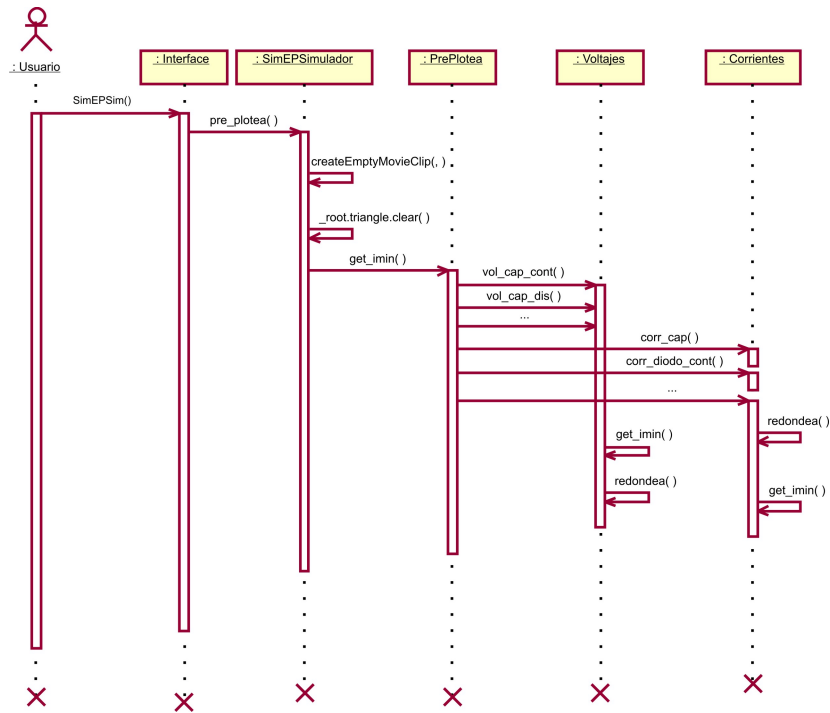


Figura 4.6: Diagrama de secuencia para el caso de uso simulador

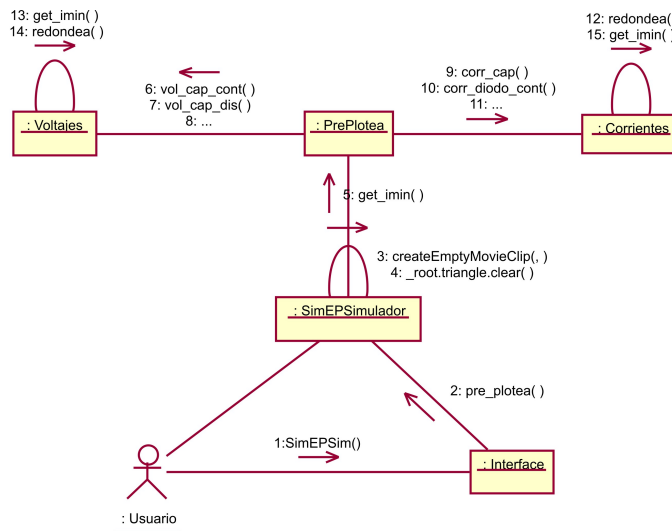


Figura 4.7: Diagrama de colaboración para el caso de uso simulador

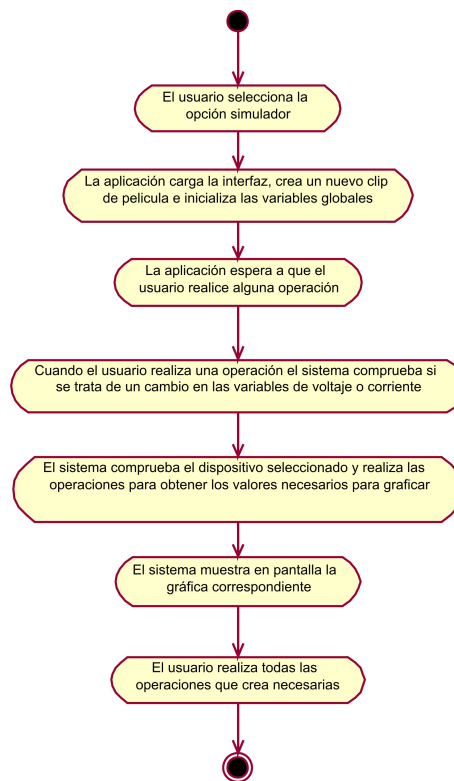


Figura 4.8: Diagrama de actividades para el caso de uso simulador

Especificación del caso de uso realizar examen

En este caso de uso el SimEP muestra una evaluación de acuerdo a la información correspondiente al convertidor seleccionado. En ella se muestran 6 preguntas, una por una con 4 posibles respuestas. El usuario puede seleccionar solo una de ellas, disparando así un evento. Posteriormente el SimEP muestra la siguiente pregunta en espera de la selección del usuario. El objetivo de este caso es que el usuario evalúe de forma interactiva los conocimientos adquiridos mediante el uso del SimEP, así también como la comprensión de las características y el funcionamiento del convertidor seleccionado. La Tabla 4.5 muestra el historial de revisiones y la Tabla 4.6 el flujo básico del caso de uso realizar examen.

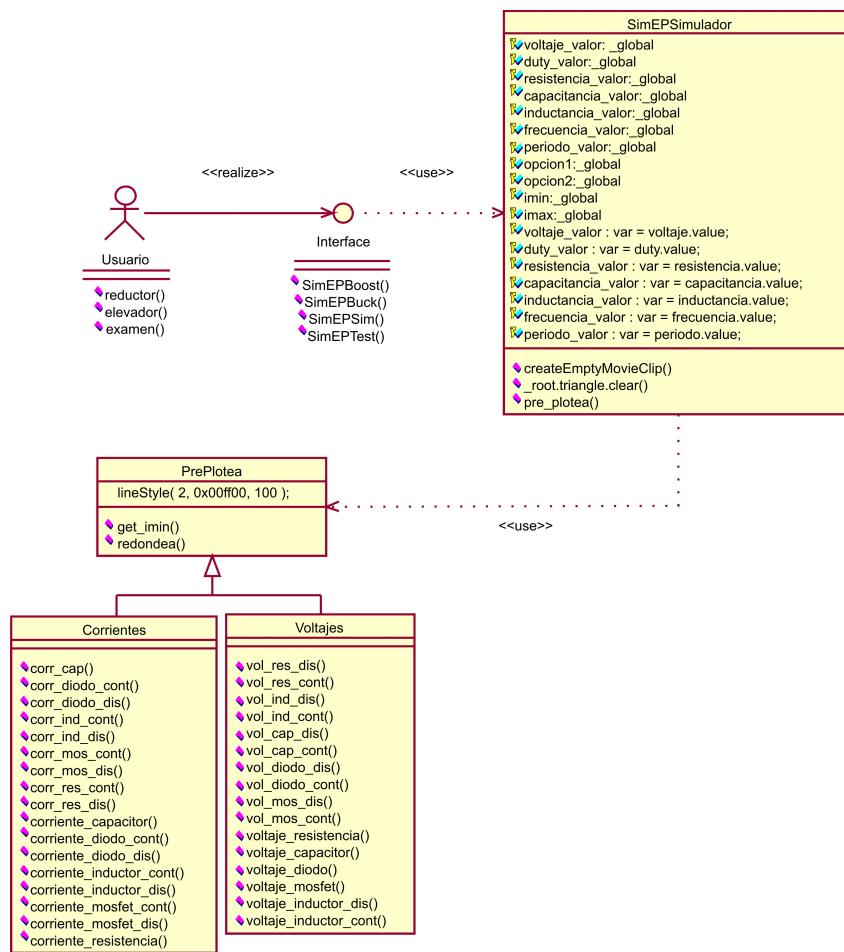


Figura 4.9: Diagrama de clases para el caso de uso simulador

Fecha	Versión	Descripción	Autor
10/Septiembre/2007	1.0	Creación del documento	Edilberto S. M. C.
03/Marzo/2008	1.1	Primeros diagramas	Edilberto S. M. C.
20/Mayo/2008	1.2	Terminación del documento	Edilberto S. M. C.

Tabla 4.5: Historial de revisiones del caso de uso realizar examen

Todas las preguntas mostradas por este caso de uso corresponden a cálculos matemáticos, los planteamientos teóricos no forman parte de este caso de uso.

Las Figuras 4.10 - 4.13 muestran los diagramas de clases, secuencia, colaboración y de actividades del caso de uso del caso de uso realizar examen.

Actor	Sistema
1.- El usuario selecciona la opción examen	2.- El SimEP despliega una pregunta con 4 posibles respuestas de acuerdo al convertidor seleccionado
	3.- El SimEP espera a que el usuario realice una operación
4.- El usuario selecciona la respuesta que considere correcta	5.- El SimEP comprueba la respuesta y procede a mostrar la siguiente
	6.-El SimEP despliega en total 6 preguntas
7.- El usuario contesta la última pregunta	
8.- Finaliza el caso de uso realizar examen	

Tabla 4.6: Flujo básico del caso de uso realizar examen

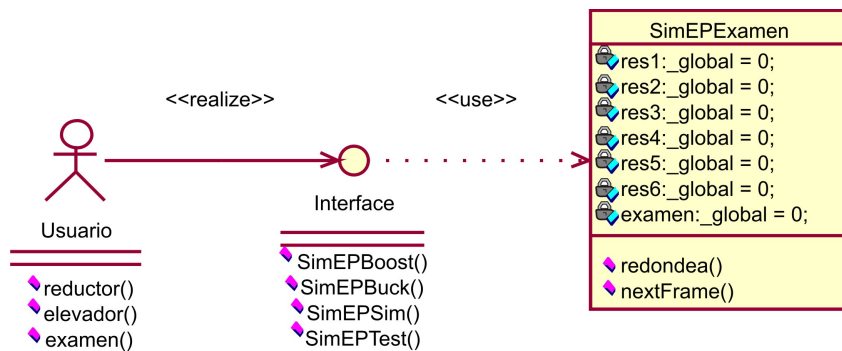


Figura 4.10: Diagrama de clases para el caso de uso realizar examen

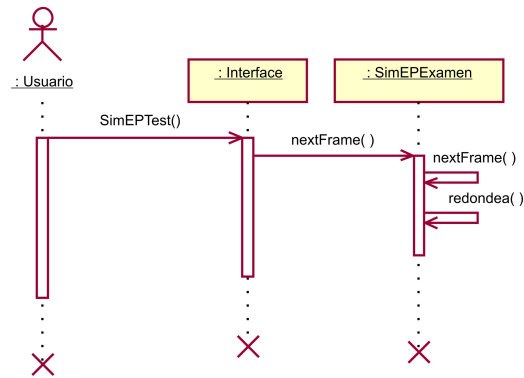


Figura 4.11: Diagrama de secuencia para el caso de uso realizar examen

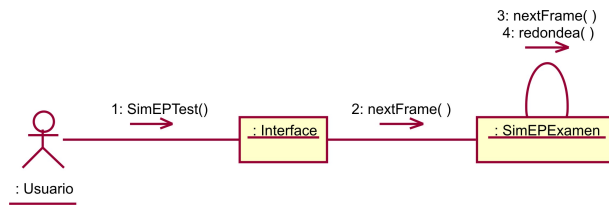


Figura 4.12: Diagrama de colaboración para el caso de uso realizar examen

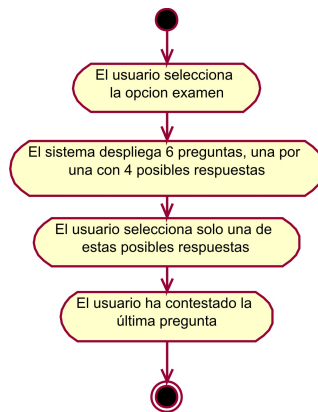


Figura 4.13: Diagrama de actividades para el caso de uso realizar examen

Especificación del caso de uso evaluar examen

En este caso de uso el SimEP evalúa las respuestas del examen del caso de uso anterior. Obtiene y muestra el promedio del mismo y de acuerdo al resultado realiza lo siguiente:

- Aprobatorio: Habilita el botón cerrar
- Reprobatorio: Muestra la opción de regresar a la etapa del simulador o al marco teórico

La Tabla 4.7 muestra el historial de revisiones y la Tabla 4.8 el flujo básico del caso de uso evaluar examen.

Fecha	Versión	Descripción	Autor
10/Septiembre/2007	1.0	Creación del documento	Edilberto S. M. C.
03/Marzo/2008	1.1	Primeros diagramas	Edilberto S. M. C.
20/Mayo/2008	1.2	Terminación del documento	Edilberto S. M. C.

Tabla 4.7: Historial de revisiones del caso de uso evaluar examen

Actor	Sistema
	1.- El SimEP obtiene el promedio de la evaluación realizada por el usuario
	2.- Si el resultado es aprobatorio el SimEP habilita el botón <i>cerrar</i>
	3.- Si el resultado es reprobatorio el SimEP muestra las opciones de las etapas de simulador o marco teórico
	4.- Finaliza el caso de uso evaluar examen

Tabla 4.8: Flujo básico del caso de uso evaluar examen

En esta etapa el usuario no interactúa con el SimEP, todas las operaciones son internas. Las Figuras 4.14 - 4.17 muestran los diagramas de clases, secuencia, colaboración y de actividades del caso de uso del caso de uso evaluar examen.

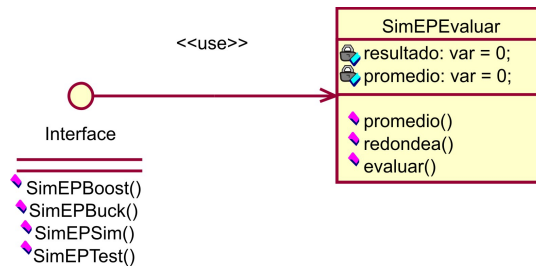


Figura 4.14: Diagrama de clases para el caso de uso evaluar examen

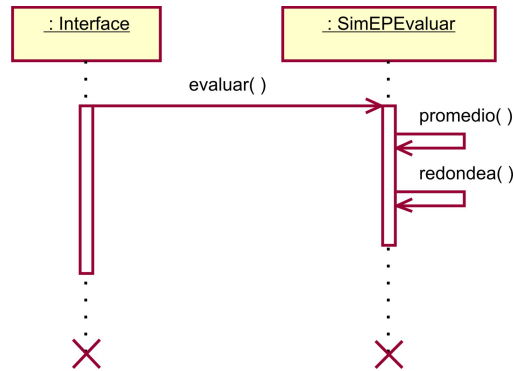


Figura 4.15: Diagrama de secuencia para el caso de uso evaluar examen

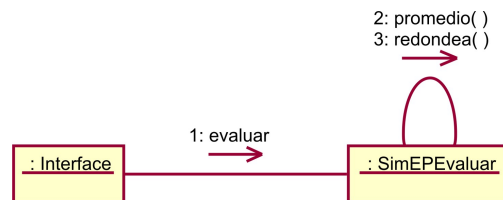


Figura 4.16: Diagrama de colaboración para el caso de uso evaluar examen

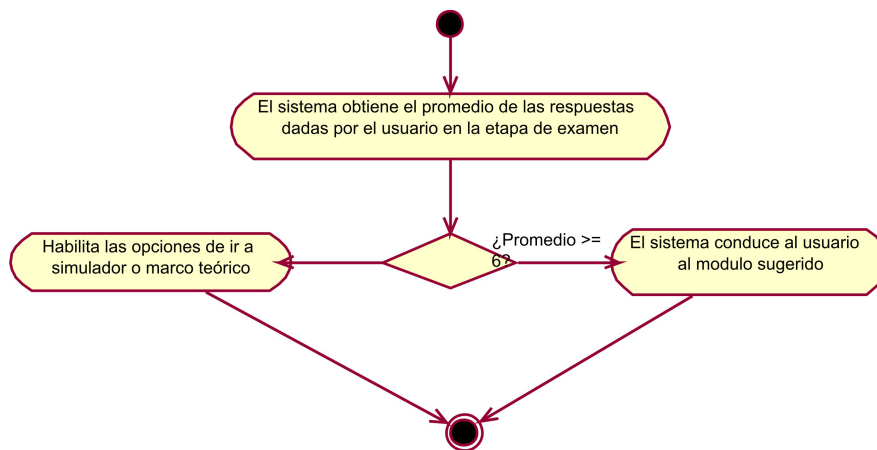


Figura 4.17: Diagrama de actividades para el caso de uso evaluar examen

4.4. Implementación

En este flujo de trabajo se tomó el resultado del diseño del SimEP para implementarlo en componentes: código fuente, animaciones, diapositivas, figuras, etc. Los artefactos que se obtuvieron en este flujo de trabajo fueron los siguientes:

- *Modelo de implementación*: Es la implementación de los elementos del diseño de la interfaz del SimEP.
- *Paquetes*: Código utilizado para la programación del sistema (clases, objetos, etc.)

Pruebas del SimEP

La fase de pruebas consistió en un análisis y estudio detallado de las funciones del SimEP con la finalidad de demostrar que los objetivos planteados al inicio de este trabajo fueron logrados exitosamente.

Cada módulo del SimEP fue sometido a pruebas con el fin de localizar errores de funcionalidad o de ejecución; para la realización de las pruebas se utilizaron dos tipos de técnicas.

- *Pruebas de caja blanca*: Consistieron en revisar detalladamente y depurar las líneas de código de cada módulo del sistema con la finalidad de encontrar errores de funcionamiento y comportamiento para corregirlos posteriormente.
- *Pruebas de caja negra*: Consistieron en realizar pruebas de cada módulo del sistema, enviando los parámetros de entrada necesarios y analizando los resultados.

- *Pruebas de usabilidad*: Las pruebas de usabilidad realizadas al SimEP se detallan en el capítulo 5.

Debido a que el sistema fue desarrollado dentro de los flujos de trabajo fundamentales del RUP, cabe mencionar que dichas pruebas se realizaron repetidas veces hasta lograr los objetivos planteados. Todos los errores encontrados fueron corregidos inmediatamente hasta lograr la calidad de ejecución y funcionamientos esperados.

Capítulo 5

Pruebas de usabilidad

En el desarrollo del software se ha reconocido a la usabilidad como factor clave para el éxito de un producto de software. Cabe señalar que las técnicas de usabilidad que nos permiten alcanzar el nivel deseado en el software, pertenecen al campo de HCI [23].

5.1. Usabilidad

A lo largo de los capítulos anteriores se ha dado a conocer el desarrollo del SimEP. En este capítulo se dan a conocer las pruebas de usabilidad realizadas a dicho software. Para comenzar, se menciona brevemente una definición del término usabilidad.

Usabilidad es el grado con el cual un producto puede ser utilizado por usuarios específicos para lograr metas específicas con efectividad y satisfacción en un contexto específico de uso.

Este término se asocia a cinco atributos que deben ser tratados en el desarrollo del software [23]:

- **Facilidad de aprendizaje:** El sistema deberá ser fácil de aprender, de forma que el usuario pueda trabajar rápidamente con él.
- **Eficiencia:** Determina el número de transacciones por unidad de tiempo que el usuario puede realizar usando el sistema. Lo que se busca es la velocidad máxima de tareas realizadas por el usuario.
- **Memoria:** Los usuarios que no utilizan el sistema regularmente, deben ser capaces de usarlo sin tener que aprender cómo funciona cada vez que lo utilicen.

- **Errores:** Un buen nivel de usabilidad implica una tasa de errores baja. Los errores reducen la eficiencia y satisfacción del usuario. Errores fatales no deben ocurrir en el sistema.
- **Satisfacción:** Muestra la impresión que el usuario tiene del sistema. Los usuarios deben sentirse a gusto con el uso del mismo.

Para lograr el objetivo de usabilidad descrito anteriormente, se realizarán pruebas de usabilidad de forma iterativa. Dichas pruebas se realizan con usuarios reales, los cuales son irremplazables, porque proporcionan información del uso directo que las personas tengan con el producto y el equipo de cómputo, sobre todo da a conocer los aspectos apropiados e inapropiados que tengan los usuarios con la interfaz. También, las pruebas de usabilidad generan retroalimentación al diseño del sistema, permitiendo que el software esté más cercano a las necesidades del usuario [21].

5.2. Importancia de la usabilidad

La principal razón por la cual se aplica la usabilidad en el desarrollo de software, es para obtener un sistema que permita incrementar la eficiencia y satisfacción del usuario al utilizar el sistema. Si lo anterior no se cumple, entonces el sistema no satisface las expectativas del usuario, por lo cual se dice que el sistema no está adecuado a las necesidades del mismo.

Los sistemas desarrollados bajo los criterios de la usabilidad tienen un mayor peso con respecto a aquellos sistemas que no los utilizan, entre las ventajas se pueden mencionar [23]:

- Mejora en la productividad
- Reducción del costo y del tiempo de aprendizaje
- Incremento de la autonomía de los usuarios finales

El 80 % de los costos de mantenimiento en los sistemas de software se deben principalmente a problemas de los usuarios con el sistema y no a problemas técnicos. Además, el 64 % de estos costos están relacionados con problemas de usabilidad. Estudios sobre el tema de la productividad en herramientas software concluyen que la facilidad de uso y

aprendizaje son las razones más importantes a la hora de incrementar de forma efectiva la productividad de los usuarios. Lo anterior resalta la importancia de la usabilidad y justifican la necesidad de su uso, durante y después del desarrollo del software [23].

5.3. Métodos utilizados en pruebas de usabilidad

Existen varios métodos para evaluar la usabilidad de un software. Algunas diferencias entre estos radican en el número de usuarios que se consideran para realizar las pruebas y la etapa de desarrollo del software en que se pueden aplicar, siendo posible combinar varios métodos como son [23], [21]:

- **Protocolo de pensamiento en voz alta (*Think Aloud Protocol*):** Cuando el usuario está realizando alguna tarea, se le solicita expresar en voz alta sus opiniones mientras interactúa con el sistema, con la finalidad de que los desarrolladores entiendan cómo visualiza el usuario el software y así poder identificar errores. Su principal ventaja radica en que es una prueba económica, ya que sólo necesita de tres a cinco usuarios, además de que permite identificar y entender las ideas que se tienen acerca del sistema. Por el contrario, su desventaja radica en que es difícil para los usuarios expresar lo que piensan.
- **Paseo cognitivo (*Cognitive Walk-Through*):** Es una técnica de revisión en la que evaluadores expertos construyen escenarios de las tareas de una especificación o de un prototipo inicial, donde los evaluadores expertos trabajan con la interfaz, como si fueran un usuario más, es decir, *realizan un recorrido por la interfaz*. A cada paso el usuario revisa la interfaz, si encuentra problemas, indica que existe un error en la misma. Se sugiere ir evaluando las especificaciones que se vayan teniendo del sistema.
- **Evaluación heurística:** Es una técnica aplicada por usuarios expertos, la cual consiste en verificar el sistema frente a un conjunto pequeño de heurísticas de diseño.
- **Entrevistas:** A través de las entrevistas, se obtienen descripciones de las reacciones y dificultades encontradas en el sistema.
- **Observaciones:** Se aplica esta técnica para saber qué hacen los usuarios cuando están interactuando con el sistema. Existen dos tipos de observaciones: formales e informales. Las observaciones formales utilizan recursos tecnológicos como la grabación

de video. Las informales consisten en que, la persona que observa realiza anotaciones sobre lo que está observando.

Para realizar las pruebas se aplicaron los métodos de paseo cognitivo y observaciones. Además con la finalidad de generar un ambiente agradable en el desarrollo de las pruebas, se siguieron las pautas de los artículos *Formatos para pruebas de usabilidad* y los formatos del *Facilitador* y del *Observador* de la página de usabilidad Usalab (<http://mixtli.utm.mx/usalab/Descargas.htm>).

Además, para la realización de dichas pruebas se requiere de un laboratorio de usabilidad, donde se pueda tener a los usuarios, el equipo de cómputo, el software a evaluar, las herramientas para las grabaciones de audio y video y así obtener material para posterior análisis.

Para el desarrollo de las pruebas de usabilidad de este trabajo, se contó con un laboratorio de usabilidad (UsaLab) ubicado en el Instituto de Electrónica y Computación (IEC) de la Universidad Tecnológica de Mixteca.

En dicho laboratorio, se copió el software en el equipo de cómputo destinado para esto, se tuvo la presencia de los usuarios reales, es decir, alumnos de la Ingeniería en Electrónica y profesores pertenecientes a el área de Electrónica de Potencia.

5.4. Descripción de las pruebas de usabilidad

Las pruebas de usabilidad se aplicaron al término de la implementación del software, lo que permite identificar y corregir a tiempo los problemas que se encontraran al interactuar los usuarios con el sistema. En seguida se da a conocer la descripción de las pruebas de usabilidad, considerando quién la aplicará, el alcance, los participantes y la estructura de las pruebas.

5.4.1. Facilitador

El facilitador es la persona responsable de dar y explicar las tareas a los usuarios, en estas pruebas el encargado de este papel fue el mismo tesista egresado de la carrera de Ingeniería de Electrónica de la Universidad Tecnológica de la Mixteca.

5.4.2. Observadores

Los observadores son los encargados de ver el comportamiento de los usuarios al utilizar el software. Su tarea es observar las reacciones del usuario ante las tareas solicitadas por parte del facilitador, además, identifican las posibles fallas del facilitador al momento de dar las instrucciones a los usuarios. En esta prueba los profesores del área de Electrónica de Potencia fungieron como observadores.

5.4.3. Participantes de las pruebas

El número de usuarios con el que se piensa realizar el estudio es de cuatro estudiantes de la carrera de Ingeniería en Electrónica de sexto semestre, ya que en este semestre el plan de estudios de la Universidad Tecnológica de la Mixteca contempla la asignatura de Electrónica de Potencia.

5.4.4. Elaboración de las pruebas

Para realizar el diseño de una tarea (caso de prueba), se sugiere que [21]:

- Las tareas sean pequeñas para que se terminen en el tiempo que el usuario esté disponible.
- La tarea especifica los resultados que los usuarios deben observar.
- Entregar al usuario las tareas por escrito.
- Permitir a los usuarios hacer preguntas a cerca de la descripción de las tareas.

A continuación se dan a conocer las tareas que se realizaron en las pruebas de usabilidad.

Tarea 1: Marco Teórico del elevador

1. En el SimEP. Por favor, haga clic en el botón que lo lleve al marco teórico del convertidor elevador.
2. Navegue por la información mostrada por el sistema.
3. Interactúe con las animaciones mostradas por el sistema.

Tarea 2: Simulador

1. En el SimEP, por favor, entre al simulador.
Introduzca los siguientes valores en los dispositivos correspondientes:
Resistencia: 12.7Ω
Voltaje: 47 V
Inductor: $210 \mu\text{H}$
Capacitor: $96 \mu\text{C}$
Ciclo de trabajo: 0.45
Periodos: 4
Frecuencia: 2 KHz
2. En el SimEP, por favor, seleccione ver la forma de onda de voltaje del:
 - 1) Inductor en la gráfica 1
 - 2) Capacitor en la gráfica 2
3. En el SimEP, por favor, seleccione ver la forma de onda de corriente del:
 - 1) Inductor en la gráfica 1
 - 2) Transistor en la gráfica 2
4. Juegue con el sistema

Tarea 3: Examen

1. En el SimEP, por favor, entre al examen
2. En el SimEP, por favor, resuelva el examen sin importar que la respuesta que elija sea la correcta.

A los usuarios se les plantearían las siguientes preguntas generales del sistema al terminar las pruebas.

1. ¿De las tres etapas anteriores, cual fue la que le agrado más?
2. ¿Considera que este sistema es útil para el aprendizaje de los convertidores CD/CD básicos sin aislamiento galvánico en sus configuraciones elevador y reductor?
3. ¿Considera que usar este sistema es mejor que consultar un libro?
4. ¿Sus impresiones finales?

5.4.5. Ejecución de tareas

Tarea 1

Al realizar esta tarea los usuarios no tuvieron ningún problema ya que los botones y la forma de navegar a través del software es intuitivo. Los colores utilizados para esta parte del sistema fueron agradables al usuario y un aporte importante por parte de ellos fue que el uso de las animaciones ayudó en gran medida a la comprensión de la información mostrada.

Tarea 2

En esta tarea hubo varios detalles que los usuarios aportaron para el mejoramiento del sistema. Uno de ellos fue el que se pudieran visualizar 2 formas de onda en una misma gráfica para realizar las respectivas comparaciones entre ellas. Además, que las formas de onda deberían estar escaladas (en amplitud y tiempo), para una mejor comprensión de la información presentada. Esta tarea fue en la que más observaciones se tuvo. Aunque, en general, los usuarios vieron que esta etapa ofrece una herramienta muy poderosa al permitir visualizar claramente como operan y se comportan los convertidores sin aislamiento galvánico. La Figura 5.1 muestra el simulador en su fase de prototipo y la Figura 5.2 muestra el simulador con las modificaciones hechas en base a los resultados de las pruebas.

Tarea 3

Los usuarios expresaron que la última tarea no represento problemas para ellos, ya que fue intuitiva y fácil de realizar. Algunos detalles aportados por ellos fueron que en esta parte, el examen es perfectamente contestable y se puede rectificar las respuestas al final del mismo.

5.4.6. Preguntas finales

Una vez realizadas las pruebas, se procedió a las preguntas finales a los usuarios participantes. Algunas de las respuestas a las preguntas se obtuvieron durante la ejecución de las tareas, es decir, los usuarios, conforme realizaban las tareas, iban expresando sus puntos de vista, muchas veces respondiendo a las preguntas que normalmente se tiene que hacer al final de la prueba.

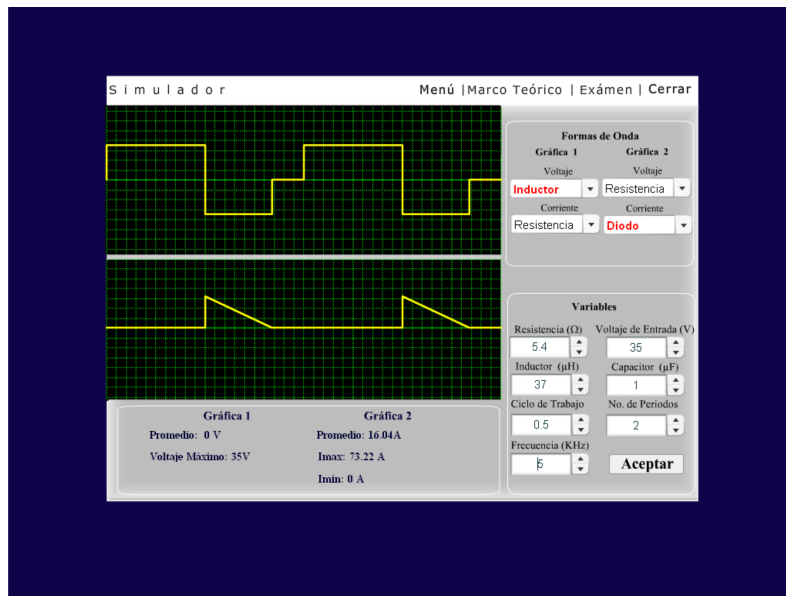


Figura 5.1: Ventana del simulador en fase de prototipo



Figura 5.2: Ventana del simulador modificado

De manera general, los usuarios expresaron que no tuvieron problemas con el uso del software, además que les resultaba de una herramienta muy eficiente e interactiva para el aprendizaje de los convertidores CD/CD sin aislamiento galvánico. Los usuarios afirmaron que la mejor parte del sistema fue la del simulador, ya que esta herramienta resulta importante al momento de visualizar el comportamiento de los dispositivos de alguno de los convertidores, sin necesidad de realizar excesivos cálculos matemáticos, que en un momento

dado llega a ser tedioso y aburrido.

Además, explicaron, que el uso de animaciones ayuda en gran medida en la explicación y comprensión de las ecuaciones y la información teórica de dichos convertidores. Ya que de ellas se puede apreciar el comportamiento y funcionamiento de los convertidores en sus 2 estados de funcionamiento: continuo y discontinuo. Además de las formas de onda de corriente de los principales elementos que componen al convertidor.

Un dato importante aportado por los usuarios, es que prefieren estudiar utilizando este sistema a consultar un libro, ya que por ser interactivo ejemplifica en gran medida los temas que se desean estudiar y resulta menos tedioso y aburrido. Esta información ayuda a comprender la importancia de los sistemas multimedia para el aprendizaje interactivo, ya que además de cumplir con los objetivos de esta tesis, ser un material de apoyo didáctico tanto para alumnos como para profesores del área de Electrónica de Potencia, ayuda a comprender la importancia del software multimedia para el proceso de enseñanza-aprendizaje.

5.5. Resultados finales

Como aportación de las pruebas de usabilidad al software, se realizaron cambios en la etapa del simulador y a la funcionalidad en algunos módulos de éste. Por ejemplo, se modificó para que muestre la forma de onda de 2 señales en una misma gráfica, colores y la escala tanto en amplitud como en tiempo de ambas formas de onda. Mientras se resolvían estos problemas, se tuvo que tomar en cuenta que mientras más pequeños sean los valores de las señales a mostrar, no se pueden apreciar correctamente, por esta razón también se redimensionó la escala en caso de que dichos valores sean muy pequeños y se puedan apreciar claramente.

Esta etapa fue probada nuevamente con los usuarios y los resultados fueron favorables, lo que permitió que formaran parte del software final.

Cabe mencionar que la ventaja que se tuvo durante el desarrollo del software, fue aplicar las pruebas de usabilidad cuando un módulo se había concluido en su fase de implementación, ya que la interpretación de dichas pruebas ayudaron a identificar problemas que en la implementación de los siguientes módulos se fueron corrigiendo. Lo anterior se logra con ayuda de la metodología RUP que dentro de su proceso iterativo, permite la retroalimentación en el diseño del software dada las pruebas de usabilidad.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajos futuros

El software educativo es una parte de las tecnologías de la educación, tiene la capacidad de transformar el proceso de enseñanza-aprendizaje, aportando nuevas mejoras para el desarrollo educativo. Como parte de esa aportación a la enseñanza, el SimEP ha contribuido a mejorar el estudio de los convertidores CD/CD sin aislamiento galvánico en los estudiantes del área de electrónica de potencia de la Universidad Tecnológica de la Mixteca.

En este trabajo de tesis se plantea que el estudiante experimente para aprender: el uso de un simulador interactivo implica que el estudiante responda de acuerdo a los estímulos proporcionados por el sistema. Además, el aprendizaje de cada estudiante consiste en la construcción del conocimiento en base a su interacción con el sistema, es decir, su conocimiento se construye cada vez que utiliza el sistema.

El proceso de desarrollo del SimEP presentó diversas fases, presentándose en cada una de ellas una serie de problemas que debían ser resueltos. Durante la fase del análisis, los problemas se relacionaban a la definición y delimitación del sistema, presentándose diferentes opiniones respecto al contenido del software educativo. El contenido fue delimitado con la colaboración directa de los profesores del Instituto de Electrónica de la UTM.

Algunos estudiantes tuvieron la oportunidad de visualizar los primeros prototipos del sistema, permitiendo señalar lo que les agradaba y lo que no les parecía apropiado en el sistema a desarrollar; los profesores también tuvieron la oportunidad de conocer la propuesta del sistema a través de prototipos realizados. Los requisitos del sistema se definieron con base a las opiniones de los profesores y los estudiantes.

En la fase de diseño es sumamente importante señalar que el uso del RUP permitió determinar qué pasos seguir para la obtención de un software de calidad. Sin la presencia de

esta metodología, los resultados hubiesen carecido de la calidad necesaria para satisfacer las expectativas planteadas al inicio del proyecto.

La fase de implementación se realizó de manera satisfactoria debido al buen análisis y diseño realizado en fases anteriores. Se presentaron situaciones que requerían de los conocimientos de un experto en usabilidad, tales como manejo de colores, ubicación de los elementos en pantalla, presentación, texto, etc. Una vez aportados los conocimientos por parte del experto, y plasmados en el SimEP, los resultados fueron satisfactorios.

Una vez puesto en marcha, los resultados obtenidos con el uso del SimEP mostraron una mejora evidente en las áreas propuestas, logrando así el cumplimiento del objetivo planteado. La información presentada, animaciones y los elementos interactivos, hacen del SimEP una herramienta atractiva para facilitar la comprensión de los convertidores CD/CD sin aislamiento galvánico.

Es apropiado resaltar que los estudiantes que hicieron uso del sistema comprendieron el funcionamiento de los convertidores, especialmente en la diferencia de los tiempos de corte y conducción, así también como en el análisis de nodos y mallas para el cálculo de los valores de corriente y voltaje en cada uno de los dispositivos que componen a dichos convertidores. Se espera que el uso continuo del sistema fortalezca el conocimiento del estudiante, permitiéndole comprender mejor el funcionamiento y las principales características de los convertidores presentados por el SimEP.

Es conveniente continuar el desarrollo de este tipo de aplicaciones, ya que permite a los alumnos reafirmar lo visto en clase de una manera interactiva, didáctica y entretenida, lo cual permite un buen aprovechamiento del sistema.

Para que el SimEP siga siendo atractivo al usuario, se proponen como trabajos futuros extender una etapa más en el sistema, la cual permita no solo simular de manera virtual, si no de manera física un dispositivo conectado en la PC con los valores de los dispositivos fijados por el usuario en la etapa de simulación. También se puede considerar como trabajo futuro la incorporación de nuevos convertidores en base a las necesidades y requerimientos que puedan presentarse en el futuro. Igualmente, el SimEP puede extenderse a otros niveles de enseñanza en el área de electrónica de potencia y electrónica en general.

Así, el desarrollo de software seguirá contribuyendo en el área de la educación, y en particular en el área de electrónica, siendo una herramienta más que apoye en la enseñanza-aprendizaje. Lo anterior será posible si durante el desarrollo del software participan áreas como HCI, que con la metodología adecuada, ayuda a conocer más de cerca a las personas

que utilizarán el software.

También, es necesario que durante el desarrollo de nuevas tecnologías se considerara el aporte que éstas puedan tener en el área de la educación, ya que el uso de la tecnología en las escuelas, ayudan a mejorar la calidad en algunos procesos que los profesores y alumnos tienen que realizar constantemente.

Apéndice A

Manual de usuario del SimEP

El SimEP es un software de enseñanza multimedia de los convertidores CD/CD básicos sin aislamiento galvánico de Electrónica de Potencia desarrollado con el objetivo de mostrar y simular el comportamiento de dichos convertidores en sus configuraciones reductora y elevadora. Fue implementado bajo la plataforma de Windows XP y desarrollado en Macromedia Flash 8.

Este documento tiene por objetivo auxiliar al usuario en el uso del SimEP, así como especificar la información que necesita cada módulo e indicar la forma en que se debe utilizar cada etapa para lograr los resultados esperados.

A.1. Recursos necesarios para ejecutar el SimEP

Para que el SimEP pueda funcionar correctamente, es necesario cumplir con los siguientes requerimientos mínimos de hardware:

- Procesador Intel Pentium 133 MHz
- Windows 95/98, NT, 2000 o posterior
- 32 MB de RAM disponible en el sistema
- Monitor compatible con 256 colores y resolución de 800x600

A.2. Ejecutar la aplicación SimEP

El SimEP es un ejecutable que no necesita de un proceso de instalación, únicamente debe de ser copiado a una computadora que cumpla con los requerimientos mínimos de hardware y ser ejecutado por el usuario. El SimEP se encuentra disponible en el CD anexo al documento de tesis.

A.3. Menú Principal

Cabe mencionar que la gama de convertidores CD/CD en circuitos de potencia es muy amplio. Por esa razón, el SimEP sólo contempla dos convertidores básicos sin aislamiento galvánico en Electrónica de Potencia: convertidor elevador y convertidor reductor. Por lo tanto, en el menú principal el usuario podrá elegir el tipo de convertidor que desea estudiar.



Figura A.1: Menú principal del SimEP

A.4. Marco teórico

Una vez que el usuario ha seleccionado el convertidor a estudiar, el SimEP muestra la información teórica de dicho dispositivo. El marco teórico esta dividido en 3 partes:

- **Convertidor:** Muestra el circuito característico del convertidor seleccionado.
- **Análisis en modo continuo:** Muestra las ecuaciones que definen el modo de conducción continuo, además de las animaciones que realizan el análisis del dispositivo y muestran las formas de onda de las principales corrientes.
- **Análisis en modo discontinuo:** Similar a la atapa anterior, muestra al usuario las ecuaciones de este modo de conducción, así como las animaciones del análisis del dispositivo y las ecuaciones que rigen su funcionamiento.

El SimEP muestra el índice del marco teórico, en el cual se puede acceder a cualquiera de las tres partes en el que éste esta dividido.

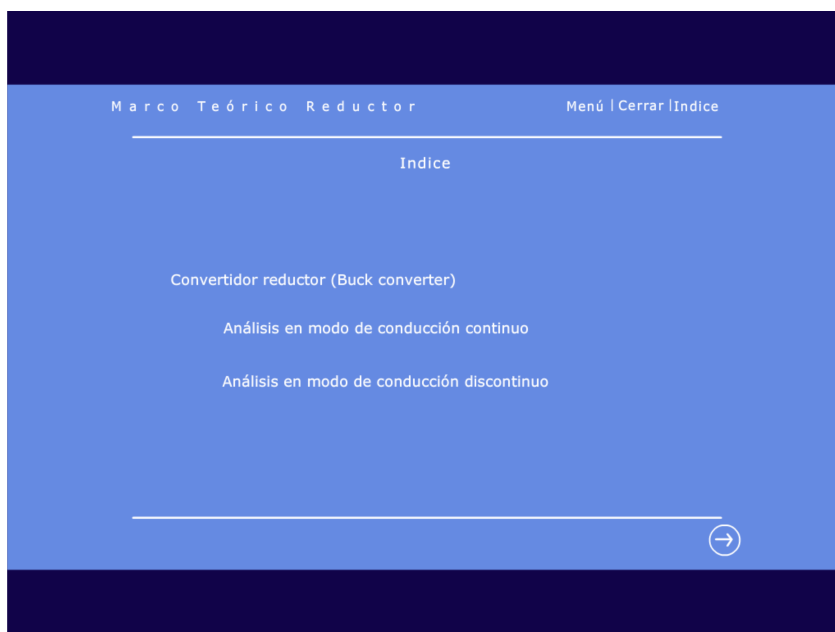


Figura A.2: Índice del marco teórico

El marco teórico también cuenta con las siguientes opciones:

- **Menú:** Permite al usuario regresar al menú principal para seleccionar los dispositivos.
- **Índice:** Vuelve a la pantalla del índice del dispositivo que se está estudiando.

- **Cerrar:** Muestra una ventana de confirmación para salir del SimEP.
- **→:** Muestra la siguiente diapositiva.
- **←:** Muestra la diapositiva anterior.

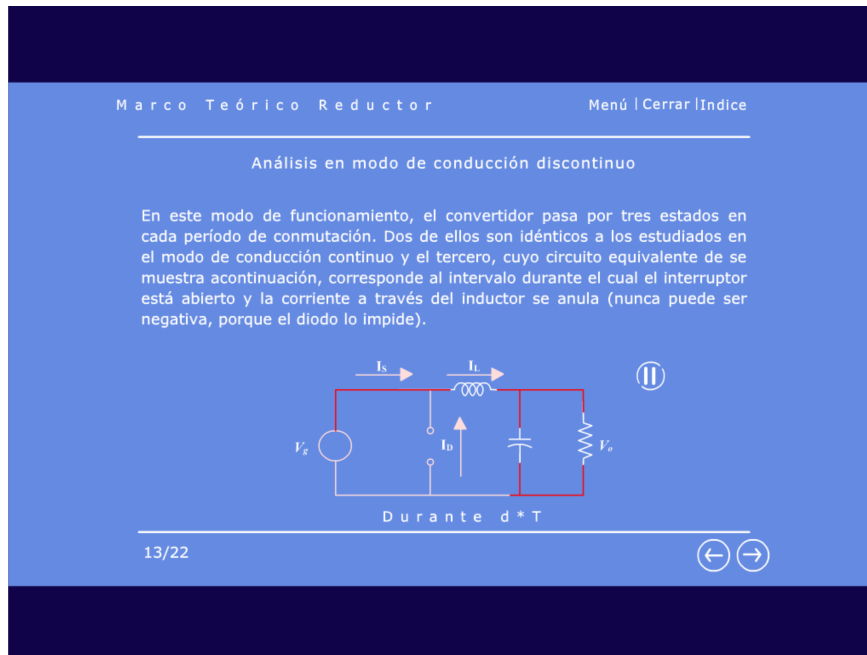


Figura A.3: Animaciones del marco teórico

El usuario puede navegar a través de la información presentada por el sistema, así como interactuar con las animaciones que éste le presenta.

Además, el SimEP muestra un contador de diapositivas en la parte inferior izquierda. Cuando el usuario llega a la última diapositiva, se habilita la opción de *Ir a simulador*. El cual lleva al usuario a la etapa del simulador del convertidor seleccionado.

A.5. Simulador

La etapa de simulación muestra las gráficas correspondientes de voltaje y corriente, tanto en modo continuo como discontinuo, de los diferentes elementos que componen al convertidor que se está estudiando. Una gráfica puede mostrar 2 señales (corriente vs voltaje) de los elementos del convertidor.

El primer paso es seleccionar las formas de onda que se desean visualizar, en el bloque *Formas de onda* que se localiza en la parte derecha de la pantalla (Figura A.4). Se puede

seleccionar una de voltaje y una de corriente en *Gráfica 1* para comparar las diferencias entre ambas. Además, se pueden seleccionar otras 2 formas de onda en el apartado *Gráfica 2*. Por lo que el SimEP puede mostrar 4 formas de onda al mismo tiempo: 2 de voltaje y 2 de corriente.



Figura A.4: Bloque formas de onda del simulador

Posteriormente se varían los valores de los elementos que conforman al convertidor, en el bloque *Dispositivos*. Cada uno de los valores de los elementos cuenta con el siguiente rango de valores:

- **Resistencia:** de 1 Ω a 100 $K\Omega$
- **Voltaje de entrada:** De 1 a 500 V
- **Inductor:** de 1 μ H a 100 H
- **Capacitor:** de 1 μ C a 100 C
- **Ciclo de trabajo:** de 0.01 a 0.99
- **Periodos:** de 1 a 50
- **Frecuencia:** de 1 KHz a 1 MHz



Figura A.5: Bloque dispositivos del simulador

Cuando el usuario realiza un cambio en cualquiera de los bloques antes mencionados, el SimEP mostrará el cambio instantáneamente en las formas de onda mostradas en la pantalla. Para cada una de las formas de onda el SimEP muestra la escala respectiva en amplitud y tiempo.

Además, el simulador muestra los resultados numéricos de cada una de las señales en la parte inferior de la pantalla como se muestra en la Figura A.6.

El simulador también cuenta con las siguientes opciones:

- **Menú:** Regresa al usuario al menú principal para seleccionar los dispositivos.
- **Examen:** Muestra en pantalla el examen correspondiente del convertidor seleccionado.
- **Cerrar:** Muestra una ventana de confirmación para salir del SimEP.
- **Ayuda:** Muestra la ayuda del simulador.

A.6. Examen

En la etapa del examen, el SimEP muestra seis preguntas con cuatro posibles respuestas (Figura A.7). El usuario deberá seleccionar una respuesta y hacer click en el botón



Figura A.6: Bloque de resultados del simulador

siguiente que se encuentra en la parte inferior derecha. Inmediatamente después, el sistema mostrará la siguiente pregunta.

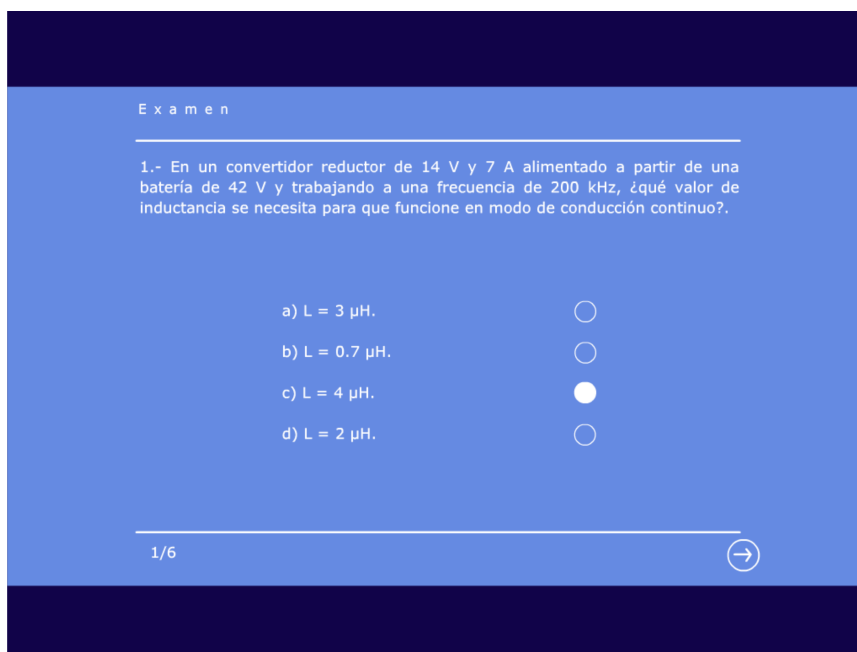


Figura A.7: Etapa de examen del SimEP

Una vez resueltas las seis preguntas, el SimEP mostrará en pantalla los resultados de la evaluación: el total de aciertos y la calificación acumulada. De acuerdo a la calificación,

el SimEP realiza lo siguiente:

- **No aprobatoria:** Despliega en pantalla los botones de *Marco teórico* y *Simulador* para que el usuario reafirme sus conocimientos y pueda realizar nuevamente el examen.
- **Aprobatoria:** Habilita el botón cerrar de la aplicación.



Figura A.8: Resultados de la etapa de examen del SimEP

Apéndice B

Caso de uso elevador

Un convertidor elevador se alimenta de una fuente de 45 V y proporciona un voltaje de salida de 150 V, tiene un ciclo de trabajo de 0.7, una frecuencia de funcionamiento de 5 KHz y la corriente en la carga es de 6 A. El valor de la inductancia es de $200\mu H$. Calcular:

- a) $i_{max}, i_{min}, \overline{i_L}$
- b) $\overline{i_D}, \overline{i_S}$
- c) El valor del capacitor para tener un voltaje de rizo de 0.5V
- d) Si el valor de la frecuencia es de 3 KHz. Calcular el valor de V_o

Datos:

$$V_g = 45V$$

$$d = 0,7$$

$$V_o = 150V$$

$$L = 200\mu H$$

$$f = 5KHz$$

$$R = \frac{V_o}{i_o} = \frac{150V}{6A} = 25\Omega$$

$$\Delta V_o = 0,5$$

Se calcula la L_{min} para identificar el modo de conducción en que opera el convertidor

$$L_{min} = \frac{d \cdot (1 - d)^2 \cdot R}{2 \cdot f} = \frac{0,7 \cdot (1 - 0,7)^2 \cdot 25\Omega}{10KHz} = 157,5\mu H$$

De acuerdo al resultado anterior, la inductancia del convertidor es mayor que la inductancia mínima ($200\mu H > 157,5\mu H$) por lo tanto, se encuentra funcionando en modo continuo.

Calculando la corriente máxima:

$$i_{max} = V_g \cdot \left(\frac{1}{(1 - d)^2 \cdot R} + \frac{d \cdot T}{2 \cdot L} \right)$$

$$i_{max} = 45 \cdot \left(\frac{1}{0,3^2 \cdot 25\Omega} + \frac{0,7}{2 \cdot 200\mu H \cdot 5KHz} \right)$$

$$i_{max} = 35,75A$$

Calculando la corriente mínima:

$$i_{min} = V_g \cdot \left(\frac{1}{(1 - d)^2 \cdot R} - \frac{d \cdot T}{2 \cdot L} \right)$$

$$i_{min} = 45 \cdot \left(\frac{1}{0,3^2 \cdot 25\Omega} - \frac{0,7}{2 \cdot 200\mu H \cdot 5KHz} \right)$$

$$i_{min} = 4,25A$$

Para la corriente promedio en el inductor:

$$\bar{i}_L = \frac{V_o}{(1 - d)^2 \cdot R} = \frac{150V}{0,3^2 \cdot 25\Omega} \Rightarrow \bar{i}_L = 20A$$

Para el cálculo de las corrientes promedio en el diodo y el interruptor:

$$\bar{i}_D = \bar{i}_L \cdot (1 - d) = 20A \cdot 0,3 = 6A$$

$$\bar{i}_S = \bar{i}_L \cdot d = 20A \cdot 0,7 = 14A$$

Calculando el valor del capacitor para tener un voltaje de rizo de 0.5V :

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{d}{R \cdot C \cdot f} \Rightarrow C = \frac{d \cdot V_o}{\Delta V_o \cdot R \cdot f}$$

$$C = \frac{0,7 \cdot 150}{25\Omega \cdot 5KHz \cdot 0,5} = 1680\mu F$$

En la Figura B.1 se muestran los resultados de las corrientes máxima, mínima y promedio en el diodo y en el transistor utilizando el SimEP. Además el voltaje promedio y de rizo en el capacitor.

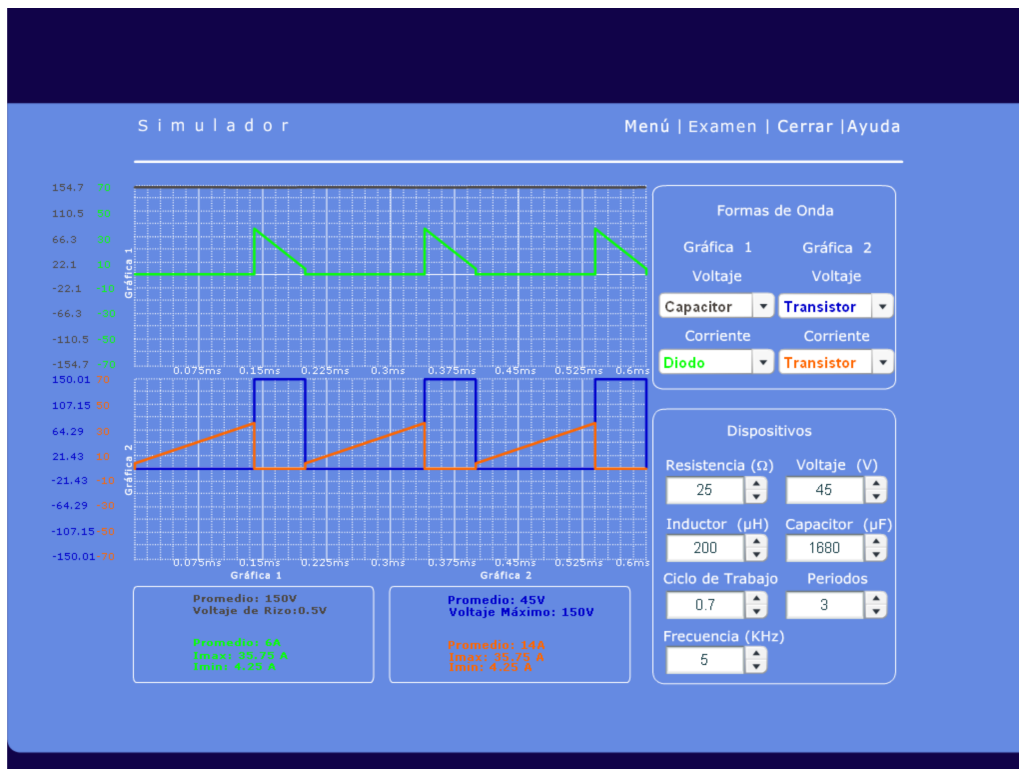


Figura B.1: Resultados del SimEP para el convertidor en modo continuo

Si la frecuencia es de 3KHz, entonces se tiene lo siguiente:

$$L_{min} = \frac{d \cdot (1 - d)^2 \cdot R}{2 \cdot f} = \frac{0,7 \cdot (1 - 0,7)^2 \cdot 25\Omega}{6KHz} = 262,5\mu H.$$

La inductancia del convertidor es menor que la inductancia mínima ($200\mu H < 262,5\mu H$) por lo tanto, se encuentra funcionando en modo discontinuo.

Calculando V_o :

$$\frac{V_o}{V_g} = \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot d^2 \cdot R}{L \cdot f}}}{2}$$

$$V_o = V_g \cdot \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot 0,7^2 \cdot 25\Omega}{200\mu H \cdot 3KHz}}}{2}$$

$$V_o = 168,027V$$

Calculando el valor del capacitor para tener un voltaje de rizo de 0.5 V, se tiene lo siguiente:

$$C = \frac{\Delta Q_c}{\Delta V_o}$$

$$\Delta Q_c = V_o \cdot \frac{T}{R} \cdot \left(1 - \frac{d'}{2}\right)^2 \cdot \frac{d + d'}{d'}$$

donde:

$$d' = \frac{V_o}{V_g} \cdot \frac{2 \cdot L}{R \cdot d \cdot T}$$

$$d' = \frac{168,027V}{45V} \cdot \frac{2 \cdot 200\mu H \cdot 3KHz}{25\Omega \cdot 0,7}$$

$$d' = 0,2560$$

Por lo tanto:

$$\Delta Q_c = V_o \cdot \frac{T}{R} \cdot \left(1 - \frac{d'}{2}\right)^2 \cdot \frac{d + d'}{d'}$$

$$\Delta Q_c = 168,027V \cdot \frac{1}{3KHz \cdot 25\Omega} \cdot \left(1 - \frac{0,2560}{2}\right)^2 \cdot \frac{0,7 + 0,2560}{0,2560}$$

$$\Delta Q_c = 6,36 \times 10^{-3} V \cdot F$$

Finalmente:

$$C = \frac{\Delta Q_c}{\Delta V_o}$$

$$C = \frac{6,36 \times 10^{-3} V \cdot F}{0,5V}$$

$$C = 12,720mF$$

En la Figura B.2 se muestran los resultados de las corrientes máxima, mínima y promedio en el diodo y en el transistor utilizando el SimEP. Además el voltaje promedio y de rizo en el capacitor.

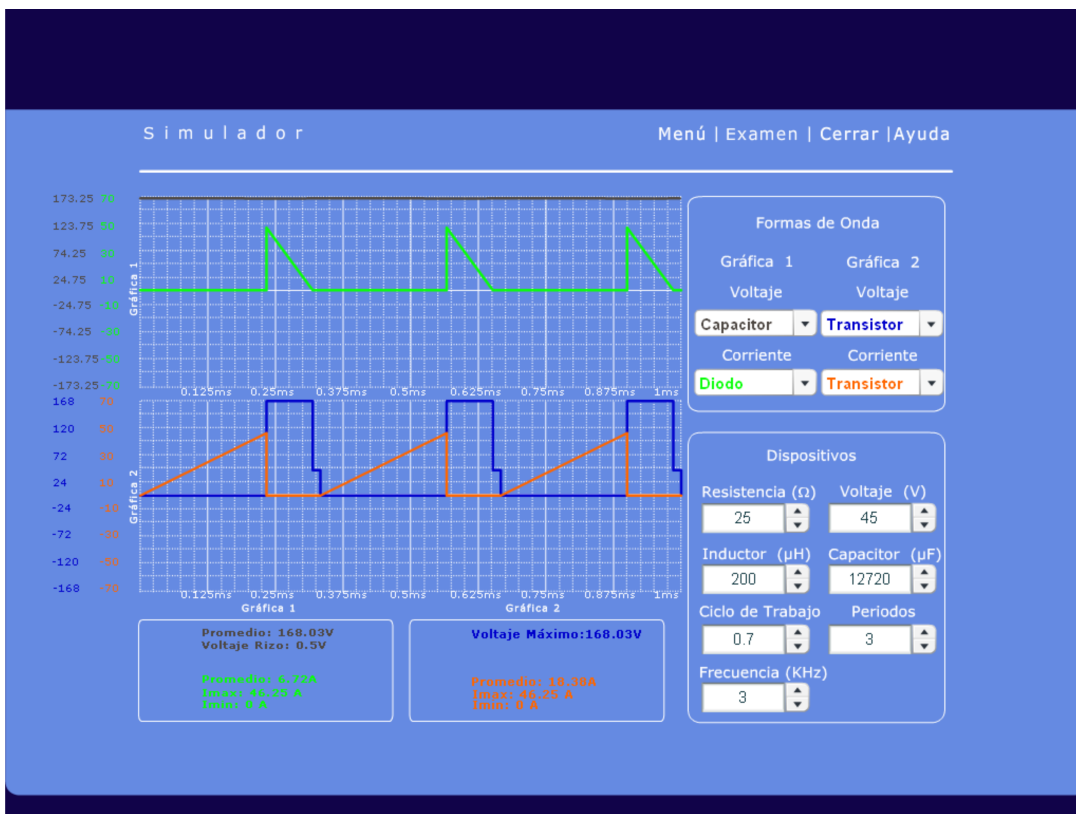


Figura B.2: Resultados del SimEP para el convertidor en modo discontinuo

Apéndice C

Caso de uso reductor

Un convertidor reductor se alimenta de una fuente de 50 V, un ciclo de trabajo de 0.4 y una frecuencia de funcionamiento de 20 KHz. El valor de la inductancia es de $200\mu H$, la capacitancia de $100\mu F$ y la resistencia de carga es de 20Ω . Calcular:

- a) V_o
- b) $i_{max}, i_{min}, \overline{i_L}$
- c) $\overline{i_D}, \overline{i_S}$
- d) P_i, P_o
- e) ΔV_o
- e) Si el valor de la frecuencia es de 12 KHz. Calcular el valor de V_o

Datos:

$$V_g = 50V$$

$$d = 0,4$$

$$L = 400\mu H$$

$$C = 100\mu F$$

$$f = 20KHz$$

$$R = 20\Omega$$

Se calcula la L_{min} para identificar el modo de conducción en que opera el convertidor

$$L_{min} = \frac{(1-d) \cdot R}{2 \cdot f} = \frac{(1-0,4) \cdot 20\Omega}{40KHz} = 300\mu H.$$

De acuerdo al resultado anterior, la inductancia del convertidor es mayor que la inductancia mínima ($400\mu H > 300\mu H$) por lo tanto, se encuentra funcionando en modo continuo.

Calculando el valor del voltaje de salida:

$$V_o = V_g \cdot d = 50V \cdot 0,4 = 20V$$

Calculando la corriente máxima:

$$\begin{aligned} i_{max} &= V_o \cdot \left(\frac{1}{R} + \frac{1-d}{2 \cdot L \cdot f} \right) \\ i_{max} &= 20V \cdot \left(\frac{1}{20\Omega} + \frac{1-0,4}{2 \cdot 400\mu H \cdot 20KHz} \right) \\ i_{max} &= 1,75A \end{aligned}$$

Para la corriente mínima:

$$\begin{aligned} i_{min} &= V_o \cdot \left(\frac{1}{R} - \frac{1-d}{2 \cdot L \cdot f} \right) \\ i_{min} &= 20V \cdot \left(\frac{1}{20\Omega} - \frac{1-0,4}{2 \cdot 400\mu H \cdot 20KHz} \right) \\ i_{min} &= 0,25A \end{aligned}$$

Para la corriente promedio en el inductor:

$$\bar{i}_L = \frac{V_o}{R} = \frac{20V}{20\Omega} \Rightarrow \bar{i}_L = 1A$$

Para el cálculo de las corrientes promedio en el diodo y el interruptor:

$$\overline{i_D} = \overline{i_L} \cdot (1 - d) = 1A \cdot 0,6 = 0,6A$$

$$\overline{i_S} = \overline{i_L} \cdot d = 1A \cdot 0,4 = 0,4A$$

De acuerdo a la estructura del elevador, la corriente que circula a través de la fuente es $\overline{i_S}$, por lo tanto, la potencia de entrada y salida esta dada por:

$$P_i = V_g \cdot \overline{i_S} = 50V \cdot 0,4A = 20W$$

$$P_o = \frac{V_o^2}{R} = \frac{20V^2}{20\Omega} = 20W$$

Calculando ΔV_o :

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1 - d}{8 \cdot L \cdot C \cdot f^2}$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1 - 0,4}{8 \cdot 400\mu L \cdot 100\mu F \cdot (20KHz)^2} = 0,469 \%$$

En la Figura C.1 se muestran los resultados de las corrientes máxima, mínima y promedio en el diodo y en el transistor utilizando el SimEP. Además el voltaje promedio y de rizo en la resistencia.

Si la frecuencia es de 12KHz, entonces se tiene lo siguiente:

$$L_{min} = \frac{(1 - d) \cdot R}{2 \cdot f} = \frac{(1 - 0,4) \cdot 20\Omega}{40KHz} = 500\mu H.$$

La inductancia del convertidor es menor que la inductancia mínima ($400\mu H < 500\mu H$) por lo tanto, se encuentra funcionando en modo discontinuo.

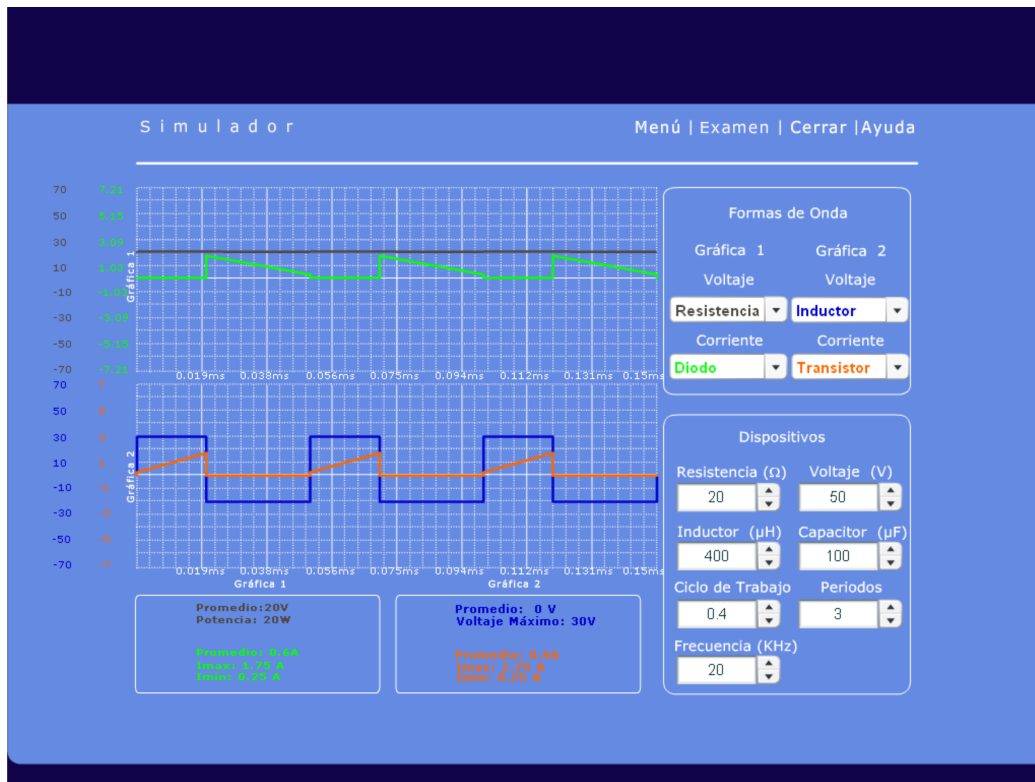


Figura C.1: Resultados del SimEP para el convertidor en modo continuo

Calculando V_o :

$$V_o = V_g \cdot \frac{2d}{d + \sqrt{d^2 + \frac{8 \cdot L}{R \cdot T}}}$$

$$V_o = 50V \cdot \frac{2 \cdot 0,4}{0,4 + \sqrt{0,4^2 + \frac{8 \cdot 400\mu\text{L} \cdot 12\text{KHz}}{20\Omega}}}$$

$$V_o = 21,71V$$

En la Figura C.2 se muestran los resultados de las corrientes máxima, mínima y promedio en el diodo y en el transistor utilizando el SimEP. Además el voltaje promedio y de rizo en la resistencia.

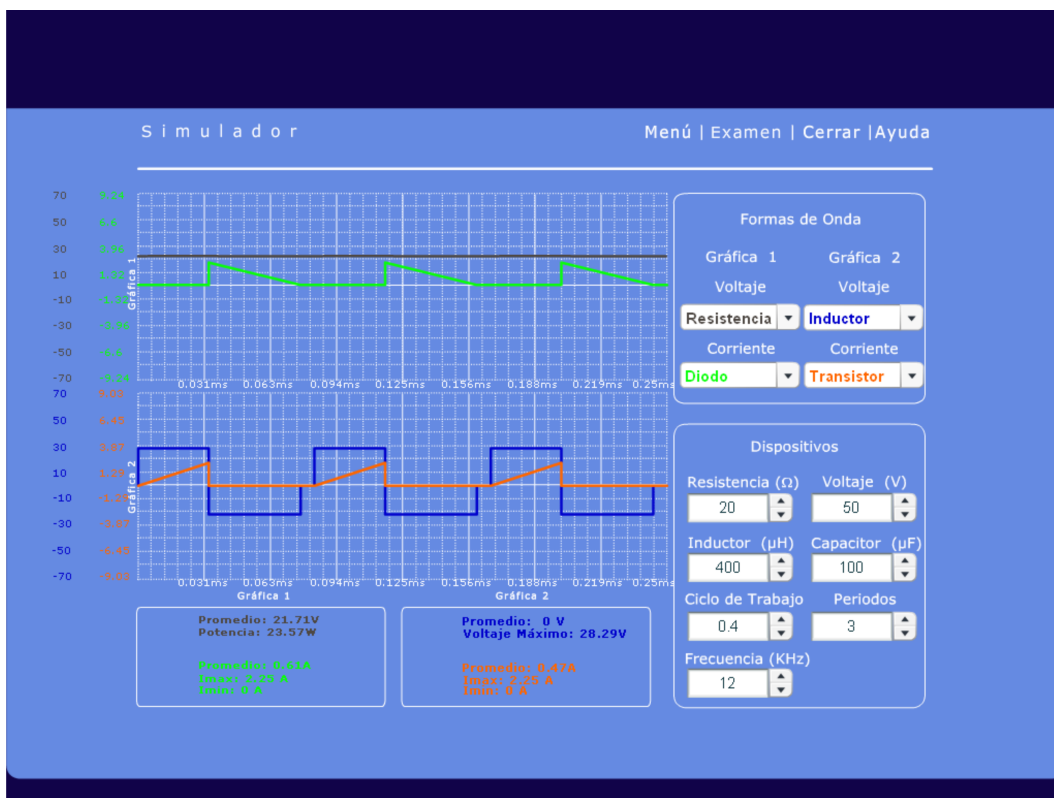


Figura C.2: Resultados del SimEP para el convertidor en modo discontinuo

Bibliografía

- [1] J. Aguilar. “Sistema Tutor Multimedia de Electrónica de Potencia: Amplificadores de Potencia”. *Departamento de Electrónica, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Jaén, España*, 1998.
- [2] S. Ang. *Power-Switching Converters*. Taylor & Francis Group, 2005.
- [3] S. Banerjee. “Border-collision bifurcations in the buck converter”. *Institute of Physical Science & Technology, Maryland University, U.S.*, vol. 45, pp. 707–716, Julio 1998.
- [4] I. Batarseh. *Power Electronic Circuits*. John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [5] M. Castro. “Nuevos Materiales Educativos en la Enseñanza Teórica y Práctica de la Electrónica”. *Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Nacional de Educación a Distancia, España*.
- [6] J. Córcoles. “Modelado de Aplicaciones con UML, Ingeniería de Software Gestión”. *Universidad de Castilla-La Mancha, España*.
- [7] M. di Bernardo. “Discrete-time maps for the analysis of bifurcations and chaos in DC/DC converters”. *Department of Engineering Mathematics and Mechanical, University of Bristol, England*, vol. 47, pp. 130–143, Febrero 2000.
- [8] E. Fossas. “Study of chaos in the buck converter”. *Dept. de Matemática Aplicada & Telemática, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona*, vol. 43, pp. 13–25, Enero 1996.
- [9] S. Gallardo. “Aplicación de Tecnologías Multimedia para el Aprendizaje Asíncrono de Instrumentación Electrónica”. *Departamento de Ingeniería Electrónica, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, España*.

-
- [10] M. Gómez. “Material Educativo Computarizado para Enseñanza de la Instrumentación Básica en Electrónica”. *Facultad Seccional Duitama. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia*.
- [11] J. González. “Sistema para la Enseñanza y el Aprendizaje de los Microcontroladores”. *Departamento de Ing. Informática, Universidad de de Coimbra, Portugal*.
- [12] F. R. González Jiménez. “Software Educativo para Apoyo en la Adquisición Fonológica de Vocales y Constantes en Niños con Discapacidad Auditiva Profunda”. Tesis de licenciatura, Universidad Tecnológica de la Mixteca, Febrero 2006.
- [13] D. Hart. *Electrónica de potencia*. Prentice Hall, 2001.
- [14] L. Herrero. “Sistema Multimedia de Apoyo a las Prácticas de Electrónica de Potencia”. *Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad de Valladolid, España*.
- [15] I. Jacobson. *El proceso Unificado de Desarrollo de Software*. Addison Wesley, 2000.
- [16] A. Lavariega Arista. “Diseño y desarrollo de un Softphone para telefonía IP utilizando Protocolo IAX”. Tesis de licenciatura, Universidad Tecnológica de la Mixteca, Junio 2007.
- [17] P.-W. Lee. “Steady-state analysis of an interleaved boost converter with coupled inductors”. *Department of Electronic & Information Engineering, Hong Kong Polytechnic, Kowloon*, vol. 47, pp. 787–795, Agosto 2000.
- [18] J. Linares-Flores. “DC motor velocity control through a DC-to-DC power converter”. *Departamento de Ingeniería Eléctrica, CINVESTAV-IPN, Mexico City, Mexico*, vol. 5, pp. 5297– 5302, Diciembre 2004.
- [19] N. Mohan. *Power Electronics: Converters, Applications and Design*. John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [20] F. Mora. “UML: Lenguaje Unificado de Modelado”. *Universidad de Alicante*, 2002.
- [21] M. d. R. Peralta Calvo. “Desarrollo de un Sistema de Diagnóstico y Compensación Escolar de Dislexia para Niños de Nivel Primaria”. Tesis de licenciatura, Universidad Tecnológica de la Mixteca, Febrero 2005.

-
- [22] R. Pressman. *Ingeniería del Software, un Enfoque Práctico*. Mc Graw-Hill, 1993.
- [23] Y. Quintas. “EZ-KET Software Educativo para el Apoyo de la Enseñanza del Idioma Inglés a Nivel KET en la UTM”. Tesis de licenciatura, Universidad Tecnológica de la Mixteca, Noviembre 2005.
- [24] M. Rashid. *Power Electronics Handbook*. Academic Press, 2001.
- [25] M. Rashid. *Electrónica de Potencia: Circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Prentice Hall, 3a. edition, 2004.
- [26] J. Rumbaugh. *El Lenguaje Unificado de Modelado. Manual de Referencia*. Addison Wesley, 2000.
- [27] I. Sommerville. *Ingeniería de Software*. Addison Wesley Iberoamericana, 1998.