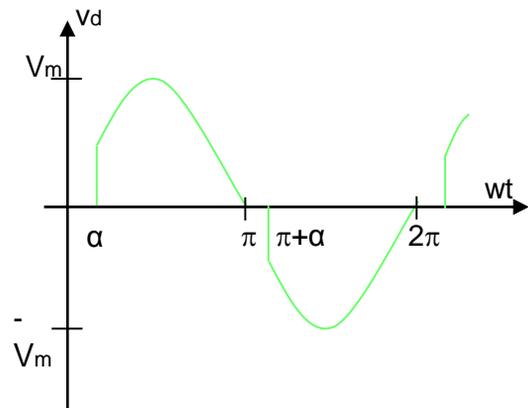
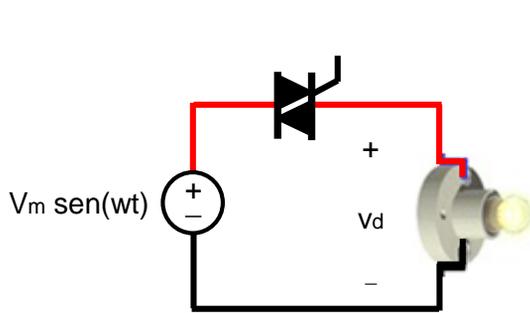


# ELEMENTOS DE ELECTRONICA DE POTENCIA



Departamento de Electricidad y Electrónica  
**UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER**

Ing. M.Sc. Germán Enrique Gallego R



# PREFACIO

Este libro tiene como propósito servir de apoyo a los estudiantes de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Electromecánica que se inician en el estudio de la electrónica de potencia y su realización consultó una extensa bibliografía del área.

La electrónica de potencia se puede definir como un saber de la ingeniería, que integra los métodos y conceptos de la electrotecnia, el control y la electrónica, para el control y conversión de la energía eléctrica.

Dado el carácter integrador de saberes de la electrónica de potencia se presentan serias dificultades a los estudiantes en la comprensión de sus conceptos y métodos, que se reflejan en bajos niveles de aprobación en la asignatura. Una de las intenciones para elaborar este texto, es poner al alcance de los estudiantes los contenidos básicos de la asignatura, desglosando conceptos y métodos, con la esperanza de mejorar el nivel de desempeño estudiantil

Este material se ha utilizado por 6 semestres con los estudiantes de Ingeniería Electromecánica y Electrónica de la Universidad Francisco de Paula Santander en la ciudad de Cúcuta (Colombia), quienes han ayudado con sus preguntas, a mejorar didácticamente el texto

Mis agradecimientos al Dr. Alfonso Alzate Gomez, profesor y director del grupo de investigación en electrónica de potencia en la Universidad Tecnológica de Pereira, por la revisión y sugerencias hechas al texto.

También es oportuno reconocer la gran colaboración de los estudiantes de Ingeniería Electromecánica U.F.P.S. Jackson Yulyan Ramírez Parra y Merielen Ardila Triana, en la elaboración de los dibujos y gráficos del texto.

El autor dedica este trabajo a los grandes amores de su vida, en especial a Dexy y Anahy, y a sus estudiantes, compañeros en el camino del aprendizaje

# CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	24
UNIDAD 1	
CONCEPTOS BÁSICOS DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA	
1.1 NATURALEZA Y APLICACIONES DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA	34
1.2 SISTEMA DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA (SEP)	35
1.2.1 Diagrama de bloques	35
1.2.2 Funciones y elementos de los bloques de un SEP	35
1.3 FUENTES DE ENERGÍA PRIMARIA	36
1.3.1 Red de suministro de voltaje alterno	36
1.3.2 Baterías	37
1.3.3 Generador eólico	38
1.3.4 Generador fotovoltaico	39
1.4 MODELAMIENTO DE COMPONENTES ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS	40
1.4.1 El capacitor	40
1.4.1.1 Generalidades	41
1.4.1.2 Modelo circuital del capacitor	41
1.4.1.3 Clases de capacitores	42
1.4.2 El transformador	43
1.4.2.1 Aspectos constructivos y operacionales	43
1.4.2.2 El transformador ideal	45
1.4.2.3 Acoplamiento de impedancias	45
1.4.2.4 Material magnético real	46
1.4.2.5 Modelo del transformador de permeabilidad finita	46
1.4.2.6 Transformador de pulsos	47
1.4.3 El inductor	48

1.4.3.1 Aspectos constructivos y operacionales	48
1.4.3.2 Comportamiento del inductor	49
1.4.3.2.1 Excitación sinusoidal	49
1.4.3.2.2 Excitación alterna cuadrada	49
1.4.3.3 Pérdidas de potencia en componentes magnéticos	50
1.4.3.4 Modelo circuital del inductor	51
1.4.3.5 Cálculo de la inductancia sin entrehierro	51
1.5 DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES IDEALES	52
1.5.1 Diodos-tiristores	52
1.5.2 Transistores de potencia	53
1.5.3 Características de control de los semiconductores de potencia	54
1.6 CIRCUITOS EXCITADOS POR FUENTES CONTINUAS	55
1.6.1 Circuito RC	55
1.6.2 Circuito RL	56
1.6.3 Circuito LC	57
1.6.4 Circuito LC de funcionamiento libre	58
1.7 MODELAMIENTO DE INTERRUPTORES	59
1.7.1 Características de un interruptor ideal	59
1.7.2 Características de un interruptor real	59
1.7.3 Características de un interruptor en conmutación	59
1.8 CIRCUITOS CONMUTADOS CON EXCITACIÓN CONSTANTE	60
1.8.1 Circuito resistivo	60
1.8.2 Circuito capacitivo	60
1.8.3 Circuito inductivo	61
1.8.4 Circuito R-L	62
1.8.5 Circuito R-C	63
1.9 CARACTERÍSTICAS DE SEÑALES	64
1.9.1 Señales periódicas bipolares	64
1.9.2 Señal periódica unipolar	65

	Pág.
1.9.3 Señal periódica PWM	65
1.10 CIRCUITOS CON EXCITACIÓN SINUSOIDAL Y CARGA LINEA	66
1.10.1 Circuito R-L	66
1.10.2 Circuito R-L-C	68
1.11 FLUJO DE POTENCIA EN REDES NO LINEALES Y EXCITACIÓN NO SINUSOIDAL	69
1.12 FACTOR DE POTENCIA Y DISTORSIÓN DE CIRCUITOS CON FUENTE SINUSOIDAL Y CARGA LINEAL	70
1.13 FILTROS	71
1.13.1 Filtro de entrada	71
1.13.2 Filtro de salida	71
1.14 TOPOLOGÍAS DE CIRCUITOS CONVERTIDORES	72
1.14.1 Convertidor CA/CD no controlado con cuatro interruptores	72
1.14.2 Convertidor CA/CD no controlado con dos interruptores	73
1.14.3 Convertidor CA/CD controlado	74
1.14.4 Convertidor CD/CA de conmutación a baja frecuencia	75
1.14.5 Convertidor CD/CA con modulación de ancho de pulso (PWM)	76
1.14.6 Convertidor CD/CA resonante	77
1.14.7 Convertidor CD/CD de alta frecuencia de conmutación	78
1.14.7.1 Convertidor CD/CD directo	78
1.14.7.2 Convertidor CD/CD indirecto	79
1.14.7.3 Convertidor CD/CD con encadenamiento CA	80
1.14.8 Convertidor CA/CA	81
1.14.8.1 Convertidor CA/CA controlador CA	81
1.14.8.2 Convertidor CA/CA ciclo convertidor	82
1.14.8.3 Convertidor CA/CA con encadenamiento en CD	83
1.15 IMPLEMENTACIÓN DE UN INTERRUPTOR POR UN DISPOSITIVO SEMICONDUCTOR	84
Bibliografía	85

Actividades: teoría y problemas	86
UNIDAD 2	
DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES DE POTENCIA	97
2.1 CLASIFICACIÓN	97
2.2 DIODOS DE POTENCIA	99
2.2.1 Generalidades	99
2.2.2 Características nominales	100
2.2.3 Conexión serie de los diodos	101
2.2.3.1 Cálculo del resistor	102
2.3 DIODOS BIDIRECCIONALES DE DISPARO CONTROLADOS POR VOLTAJE	103
2.4 RECTIFICADOR CONTROLADO DE SILICIO (SCR)	104
2.4.1 Características constructivas y operativas	104
2.4.2 Características nominales del SCR	105
2.4.3 Modelo del SCR	106
2.4.4 Encendido del SCR	108
2.4.5 Apagado del SCR(conmutación)	109
2.4.6 Circuito de compuerta	110
2.4.7 Inter-fases de disparo	111
2.4.7.1 Introducción	111
2.4.7.2 Transformadores de pulso	112
2.4.7.3 Opto- acopladores	113
2.4.7.4 Diseño del circuito de disparo con transformador de pulsos	114
2.4.8 Circuito snubber de voltajes y corriente	115
2.4.8.1 Circuito snubber de voltaje	115
2.4.8.2 Circuito snubber de corriente	116
2.4.9 Circuitos de disparo del SCR	117
2.4.9.1 Oscilador de relajación	117

	Pág.
2.4.9.2 Dispositivos de resistencia negativa	117
2.4.9.2.1 Características del UJT	118
2.4.9.2.2 Oscilador con UJT	119
2.4.9.3 El PUT	120
2.4.9.3.1 Oscilador con PUT	121
2.4.9.3.2 Sincronización de la fuente del oscilador con la fuente de corriente alterna	122
2.4.9.3.3 Aplicaciones del oscilador con PUT	123
2.4.9.3.3.1 Controlador de media onda	123
2.4.9.3.3.2 Controlador de onda completa	124
2.5 Tiristor de apagado por compuerta	125
2.5.1 Características constructivas y operativas	125
2.5.2 Modelo del GTO	126
2.5.3 Encendido y apagado del GTO	127
2.5.4 Circuitos de protección en la conmutación (snubber)	129
2.5.5 Circuito de disparo del GTO	129
2.6 TRIAC	130
2.6.1 Características constructivas y operativas	130
2.6.2 Circuitos de disparo del triac	131
2.7 Transistor bipolar de unión (BJT)	132
2.7.1 Características constructivas y operativas	132
2.7.2 Características de encendido	133
2.8 Transistor de efecto campo	134
2.8.1 Características constructivas y operativas	134
2.8.2 Modelamiento	135
2.8.3 Circuito de disparo	136
2.9 Transistor bipolar de compuerta aislada	137
2.9.1 Características constructivas y operativas	137
2.9.2 Modelamiento	138
2.9.3 Circuito de disparo	139

Actividades: teoría y problemas	142
UNIDAD 3	
CONVERTIDORES CA/CD NO CONTROLADOS	146
3.0 Introducción	146
3.1 Rectificador de media onda y carga resistiva	147
3.2 Rectificador de media onda y carga resistiva-inductiva	148
3.3 Rectificador de media onda y carga resistiva-inductiva con diodo de rueda libre	149
3.4 Rectificador de media onda y carga resistiva-inductiva con diodo de rueda libre e inductancia en la fuente	150
3.5 Rectificador de media onda y carga resistiva-capacitiva	151
3.6 Rectificador monofásico tipo semi-puente	152
3.7 Rectificador monofásico tipo puente con carga muy inductiva	153
3.8 Rectificador monofásico tipo puente con carga muy inductiva e inductancia en la fuente	154
3.9 Rectificador trifásico de tres pulsos	155
3.10 Rectificador trifásico de seis pulsos	156
3.10.1 Formas de onda de la corriente en la fuente del rectificador de seis pulsos	157
3.11 Rectificador de doce pulsos	158
3.12 Filtros CA y CD para rectificadores monofásicos con carga muy inductiva	159
3.12.1 Filtro CD capacitivo para rectificador monofásico	160
3.12.2 Filtro CD inductivo-capacitivo para rectificador monofásico	161
3.12.3 Filtro CA para rectificador monofásico	162
Bibliografía	163
Actividades :teoría y problemas	164

## UNIDAD 4

CONVERTIDORES CA/CD CONTROLADOS	170
4.0 Introducción	170
4.1 Rectificador controlado de media onda y carga resistiva	171
4.2 Rectificador controlado monofásico tipo semi-puente	172
4.3 Rectificador controlado monofásico tipo puente con carga muy inductiva	173
4.4 Rectificador controlado monofásico tipo puente y carga con fuerza electromotriz	174
4.5 Factor de potencia del Rectificador controlado monofásico tipo puente y carga muy inductiva	175
4.6 Rectificador tipo puente con inductancia de conmutación	176
4.7 Rectificador controlado monofásico tipo semi-puente con carga muy inductiva	177
4.8 Factor de potencia del rectificador controlado tipo semi-puente con carga muy inductiva	178
4.9 Rectificador controlado tipo semi-puente con inductancia de conmutación y carga muy inductiva	179
4.10 Circuitos de control para rectificadores monofásicos	180
4.10.1 Introducción	180
4.10.2 Control tipo rampa	181
4.10.3 Control cosenoidal con componente CD	182
4.10.4 Control cosenoidal puro	183
4.10.5 Control de lazo cerrado para rectificadores	184
4.11 Rectificador trifásico controlado de serie pulsos	185
4.11.1 Voltaje de salida	185
4.11.2 Corriente de la fuente y factor de potencia	186
4.11.3 Control rampa para rectificadores trifásicos	187
Bibliografía	188
Actividades: teoría y problemas	189

## UNIDAD 5

5.1 FUENTES CD LINEALES vs FUENTES CONMUTADAS	195
5.2 INTRODUCCIÓN A LOS CONVERTIDORES CD/CD CONMUTADOS	196
5.3 CELDA CANÓNICA DE CONMUTACIÓN.	197
5.4 CONVERTIDOR CD/CD DIRECTO REDUCTOR.	198
5.4.1 Modo de conducción continuo .	198
5.4.2 Implementación de interruptores.	199
5.5 CONVERTIDOR CD/CD DIRECTO ELEVADOR.	200
5.5.1 Modo de conducción continuo.	200
5.5.2 Implementación de interruptores.	201
5.6 MODELO CIRCUITAL DEL CONVERTIDOR DIRECTO. PARA RIZADO DE VOLTAJE Y CORRIENTE	202
5.6.1 Cálculo de L y C mínimos .	202
5.6.2 Inductancia crítica.	204
5.7 CONDUCCIÓN DISCONTINUA CON $V_1$ CONSTANTE DEL CONVERTIDOR DIRECTO REDUCTOR.	205
5.8. CONVERTIDOR INDIRECTO (REDUCTOR/ELEVADOR).	206
5.8.1 Modo de conducción continuo .	207
5.8.2 Implementación de interruptores.	208
5.8.3 Modelo circuital para rizado de voltaje y corriente.	209
5.8.5 Inductancia crítica.	210
5.9 VARIANTES TOPOLÓGICAS DEL CONVERTIDOR INDIRECTO.	211
5.10 CIRCUITOS DE CONTROL-CONVERTIDOR NO AISLADO	212
5.11 CONVERTIDORES AISLADOS “BUCK-DERIVED”	213
5.12 CONVERTIDORES AISLADOS.	214
5.13 CONVERTIDOR AISLADO FLY-BACK.	215
Bibliografía	216
Actividades: teoría y problemas	217

## UNIDAD 6: CONVERTIDORES CD/CA

6.0 INTRODUCCIÓN.	222
6.1 INVERSOR DE VOLTAJE CON BAJA FRECUENCIA DE CONMUTACIÓN	223
6.1.1 Carga resistiva.	223
6.1.2 Carga resistiva-inductiva.	224
6.1.3 Carga con f.e.m.	225
6.2 INVERSOR DE CORRIENTE DE BAJA FRECUENCIA DE CONMUTACIÓN.	226
6.3 ANÁLISIS DE ARMÓNICOS EN INVERSORES DE BAJA FRECUENCIA .	227
6.4 INVERSORES CON MODULACIÓN DE ANCHO DE PULSO.	228
6.4.1 Del convertidor CD/CD al inversor PWM	228
6.4.2 Convertidor CD/CD y “desrectificador	230
6.4.3 Inversor puente PWM.	231
6..4.4 Generación de la relación de trabajo.	232
6.5 INVERSORES TRIFÁSICOS.	233
6.5.1 Configuración.	233
6.5.2 Inversor trifásico –carga delta o estrella.	234
Bibliografía	235
Actividades: teoría y problemas	236

## UNIDAD 7: ANÁLISIS Y DISEÑO DE LOS COMPONENTES MAGNÉTICOS.

7.1 INTRODUCCIÓN A LOS COMPONENTES MAGNÉTICOS	240
7.2 COMPORTAMIENTO DE UN COMPONENTE MAGNÉTICO.	241
7.3 MODELO MATEMÁTICO DE LA INDUCTANCIA.	242
7.3.1 Cálculo de la inductancia	242
7.3.2 Cálculo de la inductancia del toroide	244
7.4 APLICACIÓN DEL CONCEPTO DE RELUCTANCIA AL CÁLCULO DE LA INDUCTANCIA DE UN NÚCLEO DE TRES RAMAS.	245
7.5 INDUCTOR DE NÚCLEO CON ENTREHIERRO.	247

7.6 EL TRANSFORMADOR.	249
7.6.1 Aspectos constructivos y operacionales.	249
7.6.2 Modelamiento del transformador.	251
7.6.2.1 Transformador ideal.	251
7.6.2.2 Transformador con permeabilidad finita.	253
7.6.3 Saturación del transformador.	255
7.7 FENÓMENO DE HISTÉRESIS EN NUCLEOS MAGNÉTICOS.	256
7.8 CORRIENTES PARÁSITAS Y SUS EFECTOS EN NÚCLEOS.	257
7.9 EFECTO PIEL EN CONDUCTORES.	258
7.10 SOLUCIONES AL EFECTO PIEL.	260
7.11 MODELAMIENTO DE LAS PÉRDIDAS EN UN INDUCTOR.	261
7.12 MODELAMIENTO DEL INDUCTOR.	262
7.12.1 Excitación constante	262
7.12.2 Excitación alterna sinusoidal	263
7.12.3 Excitación alterna cuadrada	264
7.13 CLASES DE NÚCLEOS Y PARÁMETROS GEOMÉTRICOS.	265
7.14 DIMENSIONES ÓPTIMAS DE LOS NÚCLEOS.	266
7.15 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	268
7.15.1 Transferencia por conducción.	268
7.15.2 Transferencia por convección.	269
7.15.3 Transferencia de calor por radiación.	270
7.16 CONSIDERACIONES TÉRMICAS PARA EL DISEÑO.	271
7.17 PÉRDIDAS EN EL BOBINADO POR RESISTENCIA.	273
7.18 PÉRDIDAS DE POTENCIA EN UN COMPONENTE MAGNÉTICO.	274
7.19 RELACIÓN ENTRE $P_{uv}$ Y “J” CON LA GEOMETRÍA DEL NÚCLEO.	275
7.20 CÁLCULO DEL VALOR PICO DE “B” EN EL NÚCLEO.	277
7.21 CÁLCULO DE LA INDUCTANCIA SIN ENTREHIERRO.	278
7.22 DISEÑO DE UN INDUCTOR SIN ENTREHIERRO.	279

7.23 APLICACIONES Y CARACTERÍSTICAS DE LAS FERRITAS.	280
7.24 EFECTO DEL ENTREHIERRO EN LA CURVA DE HISTÉRESIS.	281
7.2.5 EFECTO DEL ENTREHIERRO EN LA DISTRIBUCIÓN DE "B".	283
7.2.6 NÚCLEO EQUIVALENTE.	284
7.2.7 CÁLCULO DE LA INDUCTANCIA CON ENTREHIERRO.	285
7.2.8 DETERMINACIÓN DEL ENTREHIERRO.	286
7.2.9 DISEÑO DE UN INDUCTOR CON ENTREHIERRO	287
7.3.0 EJEMPLO DE DISEÑO DE UN INDUCTOR CON ENTREHIERRO	288
7.3.1 ARROLLAMIENTOS DEL TRANSFORMADOR.	295
7.3.2 POTENCIA APARENTE DEL TRANSFORMADOR.	297
7.3.3 CÁLCULO DEL INCREMENTO DE TEMPERATURA .	298
7.3.3.1 Áreas de disipación de transformadores.	299
7.3.4 DISEÑO DEL TRANSFORMADOR.	300
7.3.4.1 Diseño de un transformador en baja frecuencia.	301
7.3.4.2 Diseño de un transformador en alta frecuencia	307
7.3.5 TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTOS	309
7.3.6 ANÁLISIS DEL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE.	310
Bibliografía	313
Actividades: teoría y problemas	314

# LISTA DE FIGURAS

Pág.

Fig. 1.01 Electrónica de potencia	34
Fig. 1.02 Diagrama de bloques de un SEP	35
Fig. 1.03 Acometidas subterráneas	36
Fig. 1.04 Estructura de la batería	37
Fig. 1.05 Elementos de un generador	38
Fig. 1.06 Conexión del aerogenerador a la red	38
Fig. 1.07 Panel solar	39
Fig. 1.08 Sistema de generación fotovoltaico	39
Fig. 1.09 Geometría del capacitor de placas paralelas	40
Fig. 1.10 Circuito equivalente del capacitor	41
Fig. 1.10.1 Clases de capacitores	42
Fig. 1.11 El transformador	43
Fig. 1.12 Modelo circuital del transformador ideal	45
Fig. 1.13 Transformación de impedancias	45
Fig. 1.13.1 Curva de magnetización	46
Fig. 1.14 Flujos con $\mu$ finito	46
Fig. 1.15 Modelo circuital con $\mu$ finito	46
Fig. 1.16 Transformador de pulsos	47
Fig. 1.17 Núcleos magnéticos	48
Fig. 1.18 Inductor toroidal	48
Fig. 1.19 Excitación sinusoidal	49
Fig. 1.20 Excitación alterna cuadrada	49
Fig. 1.21 Lazo de histéresis	50
Fig. 1.22 Corrientes parásitas	50
Fig. 1.23 Efecto piel	50
Fig. 1.24 Modelo circuital	51
Fig. 1.25 Caracterización del núcleo	51

Fig. 1.26 Circuito RC.	55
Fig. 1.27 Circuito RL.	56
Fig. 1.28 Circuito LC .	56
Fig. 1.29 Circuito LC oscilante .	58
Fig. 1.30 Interruptor ideal .	59
Fig. 1.31 Interruptor real .	59
Fig. 1.32 Interruptor conmutado .	59
Fig. 1.33 Circuito resistivo .	60
Fig. 1.34 Circuito capacitivo .	60
Fig. 1.35 Circuito inductivo .	61
Fig. 1.36 Circuito R-L.	62
Fig. 1.37 Circuito RC conmutado .	63
Fig. 1.38 Señal periódica bipolar .	64
Fig. 1.39 Señal periódica unipolar .	65
Fig. 1.40 Señal periódica PWM .	65
Fig. 1.40.1 Circuito RL excitación sinusoidal	66
Fig. 1.41 Circuito RLC con excitación sinusoidal .	68
Fig. 1.42 Formas de onda de un circuito no lineal con excitación no sinusoidal	69
Fig. 1.43 Formas de onda de un circuito no lineal con excitación sinusoidal .	70
Fig. 1.44 Filtro de entrada.	71
Fig. 1.45 Filtro de salida de un SEP .	71
Fig. 1.46 Convertidor CA/CD no controlado .	72
Fig. 1.47 Convertidor CA/CD no controlado con dos interruptores .	73
Fig. 1.48 Convertidor CA/CD controlado .	74
Fig. 1.49 Convertidor CD/CA conmutado a baja frecuencia .	75
Fig. 1.50 Convertidor CD/CA PWM	76
Fig. 1.51 Convertidor CD/CA resonante	77

Fig. 1.52 Convertidor CD/CD directo	78
Fig. 1.53 Convertidor CD/CD buck-boost	80
Fig. 1.54 Convertidor CD/CD con encadenamiento CA	81
Fig. 1.55 Controlador CA	82
Fig. 1.56 Ciclo convertidor	83
Fig. 1.57 Convertidor CA/CA con encadenamiento CD	84
Fig.1.58 Implementación del interruptor N en un convertidor CD/CD directo reductor	85
Fig. 2.01 Símbolos de los dispositivos semiconductores	99
Fig. 2.02 Diodos de potencia	100
Fig. 2.03 Parámetros del diodo	101
Fig. 2.04 Conexión serie de los diodos	102
Fig. 2.05 Conexión serie de los diodos	103
Fig. 2.06 DIAC y SIDAC	104
Fig. 2.07 Rectificador controlado de silicio	105
Fig. 2.08 Modelamiento del SCR en régimen permanente	106
Fig. 2.09 Modelamiento del SCR en régimen transitorio	108
Fig. 2.10 Encendido del SCR	109
Fig. 2.11 Conmutación natural	110
Fig. 2.12 Conmutación forzada	110
Fig. 2.13 Circuito de compuerta	111
Fig. 2.14 Interfaces de disparo	112
Fig. 2.15 Transformador de pulsos	113
Fig. 2.16 Opto acopladores	114
Fig. 2.17 Circuito de disparo con transformador de pulsos	115
Fig. 2.18 Circuito snubber de voltaje	116
Fig. 2.19 Circuito snubber de corriente	117
Fig. 2.20 Oscilador de relajación	118

Fig. 2.22 PUT	120
Fig. 2.23 Oscilador con PUT	121
Fig. 2.24 Sincronización del pulso del oscilador con la fuente	122
Fig. 2.25 Control de media onda	123
Fig. 2.26 Control de onda completa	124
Fig. 2.27 GTO	125
Fig. 2.28 Modelo del GTO	126
Fig. 2.29 Forma de onda de la corriente de la compuerta del GTO	127
Fig. 2.30 Conmutación del GTO	128
Fig. 2.31 Circuito de disparo del GTO	129
Fig. 2.32 TRIAC	130
Fig. 2.33 Circuitos de disparo del triac	131
Fig. 2.34 BJT	132
Fig. 2.35 Encendido y apagado del BJT	133
Fig. 2.36 MOSFET canal N	134
Fig. 2.37 Modelo del MOSFET	135
Fig. 2.38 Disparo del MOSFET	136
Fig. 2.39 IGBT	137
Fig. 2.40 El IGBT	138
Fig. 2.41 Circuito de disparo	139
Fig. 3.0 Procesos de voltaje DC	146
Fig. 3.01 Rectificador monofásico con carga resistiva	147
Fig. 3.02 Rectificador monofásico con carga resistiva -inductiva	148
Fig. 3.03 Rectificador de media onda con carga resistiva -inductiva y diodo de rueda libre	149
Fig. 3.04 Rectificador de media onda, diodo de rueda libre e inductancia en la fuente	150

Fig. 3.05 Rectificador monofásico con carga resistiva capacitiva	150
Fig. 3.06 Rectificador de onda completa	151
Fig. 3.07 Rectificador de onda completa	152
Fig. 3.08 Rectificador de onda completa	153
Fig. 3.09 Rectificador trifásico de tres pulsos	154
Fig. 3.10 Rectificador de seis pulsos	155
Fig. 3.11 Corrientes en un rectificador de seis pulsos	156
Fig. 3.12 Rectificador doce pulsos	157
Fig. 3.13 Filtros CA/CD	158
Fig. 3.14 Filtro DC capacitivo	159
Fig. 3.15 Filtro inductivo capacitivo	160
Fig. 3.16 Filtro CA	161
Fig. 4.0 Aplicaciones de convertidores CA/CD controlados	169
Fig. 4.01 Rectificador controlado de media onda con carga resistiva	170
Fig. 4.02 Rectificador controlado semi-puente con carga resistiva	171
Fig. 4.03 Rectificador controlado de onda completa	172
Fig. 4.04 Rectificador controlado de onda completa y carga con fuerza electromotriz	173
Fig. 4.05 Factor de potencia en un rectificador de onda completa	174
Fig. 4.06 Rectificador puente con inductancia de conmutación	175
Fig. 4.07 Rectificador controlado semipuente	176
Fig. 4.08 Factor de potencia en un rectificador en semi-puente	177
Fig. 4.09 Rectificador semipuente con inductancia de conmutación	178
Fig. 4.10 Tipos de control de convertidores CA/CD	179
Fig. 4.11 Control tipo rampa	180
Fig. 4.12 Control cosenoidal con componente DC	182
Fig. 4.13 Control cosenoidal puro	183

	Pág.
Fig.4.14 Control de lazo cerrado	184
Fig. 4.14 Rectificador trifásico controlado	185
Fig. 4. 15 Corriente de línea del rectificador de seis pulsos	186
Fig. 4.16 Control rampa para rectificador trifásico	187
Fig. 5.1 Fuentes CD lineales y conmutadas	195
Fig. 5.2 Diagrama de bloques de un convertidor C/DCD conmutado(3)	196
Fig. 5.3 Topología mas elemental del convertidor CD/CD	197
Fig. 5.4 Convertidor directo	198
Fig. 5.5 Implementación de interruptores	199
Fig. 5.6 Convertidor elevador	200
Fig. 5.7 Implementación de interruptores	201
Fig. 5.8 Modelos circuitales para los rizados de voltaje y corriente del convertidor directo	202
Fig. 5.9 Modelos circuitales para los rizados de voltaje y corriente del convertidor directo.	203
Fig. 5.10.Límite de operación continua del convertidor directo	204
Fig. 5.11 Convertidor directo operación discontinua	205
Fig. 5.12 Convertidor indirecto	206
Fig. 5.13 Implementación de interruptores	207
Fig. 5.14 Modelos circuitales para los rizados de voltaje y corriente del convertidor indirecto	208
Fig. 5.15 Modelos circuitales para los rizados de voltaje y corriente del convertidor indirecto	209
Fig. 5.16 Límite de operación continuo en el convertidor indirecto	210
Fig. 5.17. Modelos circuitales para los rizados de voltaje y corriente del convertidor indirecto	211
Fig. 5.18 Control de modo voltaje de convertidores no aislados	212
Fig. 5.19 Convertidores aislados derivados del convertidor reductor	213
Fig. 5.20 Convertidores aislados derivados del convertidor reductor	214
Fig. 5.21 Convertidor fly-back	215

Fig. 5.23 Convertidor fly-back	218
Fig. 6.01 Aplicaciones de los convertidores CD/CA	222
Fig 6.02 Inversor tipo puente con carga resistiva	223
Fig. 6.03 Inversor puente con carga resistiva-inductiva	224
Fig 6.04 Puente inversor con carga con f.e.m.	
Fig 6.05 Fuente inversora de corriente	226
Fig 6.06 Reducción de armónicos en inversores de baja frecuencia de conmutación	227
Fig. 6.07 Convertidor reductor con relación de trabajo variable	228
Fig. 6.08 Convertidor reductor con relación de trabajo sinusoidal	229
Fig. 6.09 Convertidor CD/ CD y “desrectificador ”	230
Fig. 6.10 Inversor PWM	231
Fig. 6.11 Generación de la relación de trabajo sinusoidal PWM	232
Fig. 6.12 Inversor trifásico	233
Fig. 6.13 Inversor trifásico	234
Fig. 7.1 Inductor	240
Fig. 7.2 Transformador	240
Fig. 7.3 Relación $v - i$ .(7)	241
Fig. 7.4 Curva de magnetización del núcleo.(7)	241
Fig. 7.5 Inductor toroidal	242
Fig. 7.6 Cálculo de la inductancia	244
Fig. 7.7 Núcleo de tres ramas	245
Fig. 7.8 Inductor con entrehierro	247
Fig. 7.9 Transformador de dos arrollamientos.	249
Fig. 7.10 Transformador Ideal.	251
Fig. 7.11. Transformador con permeabilidad finita.	253
Fig. 7.12 Saturación en el transformador.	255
Fig. 7.13 Histéresis.	256
Fig. 7.14 Corrientes parásitas en el núcleo y sus efectos.	257
Fig. 7.15 Efecto piel en conductores.	258
Fig. 7.16 Efecto de la frecuencia de la corriente en la densidad de la corriente (efecto piel).(4)	259
Fig. 7.17 Optimización de los conductores.	260
Fig. 7.18 Modelamiento de las pérdidas.	261

Fig. 7.19 Inductor con excitación constante.	262
Fig. 7.20 Inductor con excitación sinusoidal.	263
Fig. 7.21 Inductor con excitación alterna cuadrada.	264
Fig. 7.22 Clases de núcleos	265
Fig. 7.23 Dimensiones del núcleo y formaleta de la bobina.	266
Fig. 7.24 Bobina ensamblada.	267
Fig. 7.25 Transferencia de calor por conducción.	268
Fig. 7.26 Flujo de calor por convección de una placa vertical.	269
Fig. 7.27 Flujo de calor por radiación.	270
Fig. 7.28 Inductor con entre-hierro y núcleo E-E.	271
Fig. 7.28 Inductor con entre-hierro y núcleo E-E.	272
Fig. 7.29 Pérdidas por resistencia.	273
Fig. 7.30 Pérdidas de potencia.	274
Fig. 7.31 $J$ y $P_{uv}$ en función de la dimensión $a$ .	275
Fig. 7.32 Campo magnético en un inductor con corriente CA y CD.	277
Fig. 7.33 Inductor sin entrehierro.	278
Fig. 7.34 Efecto del entrehierro en la curva $B - H$ .	281
Fig. 7.35 Efecto del entrehierro en $B$ .	283
Fig. 7.36 Núcleo equivalente.	284
Fig. 7.37 Inductor con entrehierro distribuidos.	285
Fig. 7.38 Inductor con entrehierro.	287
Fig. 7.39 Inductor con entrehierro y núcleo E-E.	288
Fig. 7.40 Factor de desempeño (PF) de las ferritas vs. frecuencia.	288
Fig. 7.41 Geometría del inductor y la bobina.	289
Fig. 7.42 Geometría del inductor y la bobina.	290
Fig. 7.43 Entrehierro en un núcleo E-E.	291
Fig. 7.44 $J$ en función de "a" para el núcleo 3F3 E-E.	293
Fig. 7.45 Bobina.	293
Fig. 7.46 Geometría del entrehierro.	294
Fig. 7.47 Equivalente eléctrico del circuito magnético	294
Fig. 7.48 Arrollamientos del transformador.	295
Fig. 7.49 Potencia aparente del transformador.	297
Fig. 7.50 Nomograma del incremento de la temperatura en función del área de disipación.	298

Fig. 7.51 Área de disipación de transformadores.	299
Fig. 7.52 Transformador de núcleo seco	300
Fig. 7.53 Geometría del núcleo(3)	301
Fig. 7.54 Bobinado	304
Fig. 7.55 Área de refrigeración	306
Fig. 7.56 Transformador.	307
Fig. 7.57 $J$ y $P_{sp}$ del núcleo E-E en función de $a$ .	307
Fig. 7.58 Arrollamiento del transformador.	308
Fig. 7.59 Transformadores de instrumentación.	309
Fig. 7.60 Transformador de corriente.	310

# LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Funciones y elementos de los bloques de un SEP	35
Tabla 1.1 Símbolos y característica $v-i$ ideal de diodos y tiristores	52
Tabla 1.2 Símbolos y característica $v-i$ ideal de transistores	53
Tabla 1.3 Característica de control de dispositivos semiconductores	54
Tabla 2. Características del SCR	105
Tabla 5.1 Tabla de permitividad de materiales	243
Tabla 7.1 Características del alambre magneto.	276
Tabla 7.3 Características de las ferritas.	280

# INTRODUCCION

La electrónica de potencia se puede definir como un saber de la Ingeniería, que integra los métodos y conceptos de la electrotecnia, el control y la electrónica, para el control y conversión de la energía eléctrica.

Debido al propósito de la electrónica de potencia, esta asignatura se incluye en el pensum de las carreras de ingeniería electromecánica y electrónica, en la Universidad Francisco de Paula Santander de Cúcuta. Se imparte con el nombre de electrónica IV, y electrónica de potencia I, un curso inicial de electrónica de potencia en el semestre VIII de la carrera de ingeniería electrónica, y en la carrera de ingeniería electromecánica un segundo curso sobre convertidores CD/CD, CD/CA y convertidores resonantes en el semestre VIII.

Este texto tiene como propósito servir de apoyo a los mencionados cursos

Los objetivos del curso de electrónica de potencia I son:

- 1) Interpretar las características nominales eléctricas y térmicas de los tiristores y sus híbridos
- 2) Analizar y describir las 4 topologías básicas de los convertidores de la electrónica de potencia.
- 3) Analizar y diseñar los circuitos de disparo de los tiristores
- 4) Simular y diseñar convertidores CA/CD controlados y no controlados, monofásicos y trifásicos.

Estos objetivos se cumplen con 2 horas de clase magistral, 1 hora de taller y 2 horas de laboratorio semanales, durante 14 semanas

Los objetivos del curso de electrónica de potencia II son:

- 1) Interpretar las características nominales eléctricas y térmicas de los transistores de potencia y sus híbridos.
- 2) Analizar y diseñar los circuitos de disparo de los transistores de potencia
- 3) Simular y diseñar convertidores CD/CD, no aislados y aislados.
- 4) Simular y diseñar convertidores CD/CA.
- 5) Desarrollar suficiencia en inglés instrumental

Estos objetivos se cumplen con 2 horas de clases magistrales y 2 horas de laboratorio semanales, durante 14 semanas

El autor ha tenido a cargo la asignatura de electrónica de potencia desde el año 1999, cuando se impartió por primera vez en la carrera de ingeniería electrónica en la universidad Francisco de Paula Santander (UFPS), y desde entonces se organiza el curso consultando libros de texto y documentos de la Internet.

Se utilizaron para organizar el curso y los contenidos en los primeros años, libros clásicos como los de Kassakian (5), un excelente libro del M.I.T. que lamentablemente desapareció del mercado del libro, Rashid (6), una referencia obligada en la enseñanza de la Electrónica de Potencia, Mohan(7), el libro más referenciado en los programas de Electrónica de Potencia a nivel mundial y en el 2000 el de Krein(8), un buen libro que hace énfasis en los conceptos físicos, utiliza herramientas computacionales( Matlab, Mathcad) y con un capítulo muy didáctico sobre el modelamiento de elementos activos y pasivos .

La organización y contenidos del material que se presenta en power point, se realizó con base en las conclusiones presentadas por Burdío (1), en consonancia con los debates en foros internacionales acerca de la enseñanza de la electrónica de potencia. Estas conclusiones son:

“a) Existe un acuerdo prácticamente unánime , que desde los puntos de vista de metodología didáctica, la asimilación de conceptos y motivación del alumno, resulta más aconsejable estudiar las topologías convertidoras antes que los dispositivos de potencia, haciendo una introducción previa rápida de los mismos con antelación a las topologías.

b) El tiempo invertido tradicionalmente en el estudio tecnológico de los dispositivos semiconductores de potencia, debe ser reducido, debido a la evolución cambiante de sus estructuras cada vez más complejas, en favor de criterios de selección y utilización dentro de las topologías.

c) Es importante revisar y aclarar conceptos básicos electrónicos y circuitales, como características idealizadas de dispositivos, semiconductores de potencia, comportamiento transitorio de inductancias y condensadores, definiciones de factor de potencia, distorsión armónica, valores medios y eficaces, etc.

d) Debe reducirse el tiempo dedicado tradicionalmente a circuitos rectificadores no controlados y controlados, sobre todo en los aspectos matemáticos. Se ha constatado que resulta desmotivador para el alumno y de reducida asimilación conceptual.

e) Por su escasa utilización actual, se deben eliminar del programa los conceptos de conmutación forzada con tiristores, y reducir a una breve presentación los ciclo-convertidores.

f) Se aconseja compaginar sesiones prácticas de laboratorio de simulación por computador, y de montaje o ensayos experimentales en equipos”.

De acuerdo con los diferentes enfoques de los libros antes mencionados, y a las conclusiones presentadas por Burdío (1), el autor elaboró en power point, para sustituir las diapositivas, tan necesarias en una asignatura de esta naturaleza, y para condensar conceptualmente los diferentes temas de esta asignatura, el material docente de apoyo a las asignaturas de electrónica de potencia de las carreras de ingeniería electrónica y electromecánica de la U.F.P.S. Este material no es un libro en versión de monografía, y requiere del apoyo del instructor de la materia.

El orden de presentación de los temas es el siguiente:

Electrónica de potencia I: Unidad I: Conceptos básicos; Unidad II: Dispositivos semiconductores de potencia; Unidad III: Convertidores CA/CD no controlados; Unidad IV: Convertidores CA/CD controlados.

La unidad de conceptos básicos se organiza de acuerdo a las conclusiones a) y c) de Burdío.

Se incluyen unos temas para repaso de conceptos y teorías estudiadas en asignaturas anteriores, y otros nuevos relacionados con la electrónica de potencia.

Se incluye en esta unidad el tema de circuitos conmutados. La secuencia de estos temas es la siguiente: Naturaleza de la Electrónica de Potencia; Sistema de Electrónica de Potencia; Fuentes de energía: Redes de distribución de voltaje alterno, Baterías, Generador eólico, Generador fotovoltaico; modelamiento de componentes eléctricos y magnéticos: El capacitor, El transformador. El inductor ; Dispositivos semiconductores ideales: características v-i, símbolos, características de control; Circuitos excitados por fuente continua: Circuito R-C,R-L,L-C; Modelamiento de interruptores :ideal, real, conmutado; Circuitos conmutados con excitación constante: Circuito R,L,R-L,R-C; Características de las señales; Circuitos con excitación sinusoidal y carga lineal: R-L,R-L-C ;Flujo de potencia en redes sinusoidales y carga no lineal; Factor de potencia y de distorsión en redes sinusoidales y carga no lineal; Filtros AC/DC; Topologías de circuitos convertidores: Convertidor CA/CD no controlado de 2 y 4 interruptores; Convertidor CA/CD controlado tipo puente; Convertidor CD/CA de baja frecuencia de conmutación; Convertidor CD/CA de modulación del ancho de pulso; Convertidor CD/CA resonante serie; Convertidor CD/CD directo e indirecto; Convertidor CD/CD con encadenamiento en CA; Convertidores CA/CA: Controlador CA, Ciclo-convertidor, con encadenamiento CD; Implementación de un interruptor por un dispositivo semiconductor.

La Unidad I incluye las actividades de teoría y problemas, que el estudiante debe realizar para la preparación del examen teórico.

Se finaliza la unidad con la bibliografía, que debe consultar el estudiante que desea profundizar en los temas tratados.

En la Unidad II se estudian los dispositivos semiconductores reales teniendo en cuenta la conclusión b) de Burdío(1), Se limita a lo básico el estudio de la física del semiconductor y se hace énfasis en las características operativas y criterios de selección, y en los circuitos de disparo que permiten aplicar estos dispositivos en los convertidores de la electrónica de potencia.

El contenido de esta unidad es el siguiente: Dispositivos semiconductores: Clasificación. Diodo de potencia: Generalidades; Características nominales; Conexión serie: Cálculo de R; Dispositivos bidireccionales de disparo controlados por voltaje: diac, sidac; Rectificador de silicio controlado (SCR): Características constructivas y operativas, modelamiento, características nominales, encendido, apagado, circuito de compuerta; Interfases de disparo del SCR: Transformador de pulso, Opto-acoplador; Diseño del circuito de disparo con transformador de pulso; Circuitos snubber de voltaje y de corriente; Circuitos de disparo del SCR: Oscilador de relajación, UJT; Oscilador con UJT, PUT, Oscilador con PUT. Aplicaciones del oscilador con PUT: Controlador de media onda, Controlador de onda completa. Tiristor apagado por compuerta (GTO): Características constructivas y operativas, modelamiento, encendido y apagado, Circuitos de protección en la conmutación, Circuito de disparo. Triac: Características constructivas y operativas, Circuitos de disparo. Transistor bipolar de unión (BJT): Características constructivas y operativas, Modelamiento, Circuito de disparo. Transistor de efecto de campo: Características operativas y constructivas, Modelamiento, Circuito de disparo. Transistor bipolar de compuerta aislada (IGBT): Características constructivas y operativas, Modelamiento, Circuito de disparo. La unidad termina con la bibliografía y las actividades de teoría y problemas que debe realizar el estudiante.

En la unidad III se estudian los convertidores CA/CD no controlados minimizando el análisis matemático ( Burdío (1) conclusión d)), haciendo algunas aproximaciones que permitan tener una mejor comprensión física de los fenómenos estudiados .Este es el tratamiento que se da a los rectificadores en la referencia 5( Kassakian y otros).

El contenido de esta unidad es el siguiente: Rectificador de media onda: carga R, R-L, R-L con diodo de rueda libre con y sin inductancia en la fuente, R-C. Rectificador de onda completa en sus modalidades tipo puente y semi-puente, con carga: Resistiva ; altamente inductiva, con y sin inductancia de conmutación .Rectificador trifásico de tres pulsos. Rectificador de 6 pulsos con carga altamente inductiva: Operación, voltaje promedio, forma de onda de la corriente. Rectificador serie de 12 pulsos: Operación, voltaje promedio. Filtros AC y DC para rectificador monofásico de onda completa y carga altamente inductiva.

La unidad termina con las referencias bibliográficas y las actividades a realizar por el estudiante

La unidad IV versa sobre convertidores CA/CD controlados y se estudia con el mismo criterio que la unidad III, minimizando el análisis matemático.

El contenido de esta unidad es el siguiente: Introducción. Rectificador de media onda con carga resistiva. Rectificador de onda completa semi-puente con transformador y carga resistiva. Rectificador tipo puente, con y sin inductancia en la fuente, con carga altamente inductiva: Operación, voltaje promedio, factor de potencia. Rectificador tipo puente con carga con fuerza electromotriz. Rectificador semi-puente sin transformador: Operación, voltaje promedio, factor de potencia, proceso de conmutación. Circuitos de control de rectificadores monofásicos: Introducción, control rampa, control cosenoidal puro, control cosenoidal con componente CD, control de lazo cerrado.

El curso de electrónica de potencia II es obligatorio en el pensum de ingeniería electromecánica, y opcional en el de ingeniería electrónica. El número de créditos asignado es de 3 .

La teoría se imparte en 2 horas semanales y el laboratorio en una sesión semanal de 2 horas.

El curso de electrónica potencia II está conformado por 3 unidades: convertidores CD/CD, convertidores CA/CD ,y convertidores resonantes.

La unidad V (convertidores DC/DC de alta frecuencia de conmutación) se estudian siguiendo la orientación de la referencia 5( Kassakian y otros) que toma como unidad fundamental de estos convertidores la celda canónica de conmutación.

El contenido de esta unidad es el siguiente: Fuentes DC lineales vs Fuentes conmutadas. Introducción a los Convertidores DC/DC de alta frecuencia de conmutación. Celda canónica de conmutación. Convertidor directo reductor: Operación en modo de conducción continuo, implementación de interruptores. Modelo circuital del convertidor directo para el rizado de voltaje y de corriente. Cálculo de L y C mínimos para el convertidor directo. Inductancia crítica. Conducción discontinua con  $V_1$  constante del convertidor directo reductor. Convertidor indirecto (reductor-elevador): Modo de conducción continuo; Modelo circuital para el rizado de voltaje y de corriente; Cálculo de L y C mínimo. Variantes topológicas del convertidor indirecto. Circuitos de control. Convertidores aislados.

La unidad VI trata a los convertidores CD/CA de baja frecuencia de conmutación y de alta frecuencia (PWM).

Los contenidos de esta unidad son los siguientes: Introducción a los convertidores CD/CA; Convertidor CD/CA de baja frecuencia de conmutación con carga: R, R-L, con f.e.m. Inversor de corriente. Análisis de armónicos en los convertidores de baja frecuencia de conmutación. Inversores PWM: Evolución del convertidor CD/CD de alta frecuencia de conmutación al inversor PWM. Operación del inversor puente PWM. Generación de la relación de trabajo. Inversores trifásicos: Configuración, Operación con carga en delta o en estrella.

La unidad VII versa sobre el análisis y diseño de los componentes magnéticos que se utilizan en la electrónica de potencia. El enfoque del análisis se realiza utilizando la teoría circuital y la teoría de campos. El diseño se realiza adaptando e interpretando el enfoque de la referencia 6 (Mohan y otros), para facilitar al estudiante la comprensión de este tema, de naturaleza compleja.

Los contenidos de esta unidad son los siguientes : Introducción; Comportamiento de un componente magnético; Cálculo de la inductancia; Aplicación del concepto de Reluctancia al cálculo la inductancia de un núcleo de tres ramas; Inductor de núcleo con entrehierro; El transformador: Aspectos constructivos y operacionales, Modelamiento del transformador ideal y del transformador con núcleo de permeabilidad finita, operación bajo saturación; Fenómenos de histéresis y corrientes parásitas; Efecto piel en conductores y sus soluciones; Modelamiento de las pérdidas; Modelamiento del inductor: Excitación constante; Excitación alterna sinusoidal; Excitación alterna cuadrada; Clases de núcleos y parámetros geométricos; Dimensiones óptimas de los núcleos; Mecanismos de transferencia de calor: Conducción, convección radiación; Consideraciones térmicas para el diseño; Pérdidas en el bobinado por resistencia; Pérdidas de potencia en un componente magnético; Relación entre las pérdidas por unidad de volumen y  $J$ (densidad de corriente) con la geometría del núcleo; Características del alambre magneto; Cálculo del valor pico de la densidad de campo magnético( $B$ ) en el núcleo; Cálculo de la inductancia sin entrehierro; Diseño de un inductor sin entrehierro; Aplicaciones y características de las ferritas; Efecto del entrehierro en la curva de histéresis; Efecto del entrehierro en la distribución de  $B$  en el núcleo; Núcleo equivalente; Cálculo de la inductancia con entrehierro; Determinación del entrehierro; Diseño de un inductor con entrehierro; Ejemplo de diseño; Arrollamientos del transformador; Potencia aparente del transformador en función de la geometría; Cálculo del incremento de temperatura ; áreas de disipación del transformador; Diseño del transformador; Diseño de un transformador en baja frecuencia; Diseño de un transformador en alta frecuencia; Transformadores de instrumentos; Análisis del transformador de corriente.

Los dibujos y gráficos tomados de otros autores se señalan referenciando la fuente con un número de la bibliografía de cada unidad.

Es la intención del autor presentar este material , para que el estudiante de la Universidad Francisco de Paula Santander, mayoritariamente de estratos 1 y 2 , pueda tener acceso fácil y económico a un material de estudio, y lo más importante es condensar la información requerida para cursar las asignaturas de electrónica de potencia

## BIBLIOGRAFÍA

1. Burdío J.M.. NUEVAS TENDENCIAS EN LA ENSEÑANZA DE LA ELECTRÓNICA DE POTENCIA .Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones. Centro Politécnico Superior. Universidad de Zaragoza. María de Luna, 3. 50015 Zaragoza, España.  
taee.euitt.upm.es/Congresosv2/2004/papers/2004S2G05.pdf.Consulta a Internet Enero 17, 2009
2. Aguilar J. D; Olid M, F.Baena ; Muñoz F. MATERIAL DOCENTE PARA ELECTRONICA DE POTENCIA ,ADAPTADO A LOS CREDITOS ECTS. Departamento de Ingeniería Electrónica .Escuela Politécnica de la Universidad de Jaen. espacio uned.es/fez/view.php?pid=taee . :congreso-2008-1057.Consulta a Internet Enero 17 ,2009
- 3.Bauer P.;Kolar .J.W. TEACHING POWER ELECTRONICS IN THE 21 ST CENTURY.EPE Journal Vol. 13 n° 4 November 2003.
4. Dudrik J.NEW METHODS IN TEACHING OF POWER ELECTRONICS DEVICES. Iranian Journal of Electrical and Computer Engineering Vol.4 N° 2 2005
- 5-Kassakian J.G. Schlecht M.F. Verghese G. C. PRINCIPLES OF POWER ELECTRONICS . Editorial Addison-Wesley 1991
- 6.Rashid M. H. POWER ELECTRONICS: CIRCUITS, DEVICES, AND APPLICATIONS 1993.Editorial Prentice-Hall