



UNIVERSIDAD DE IXTLAHUACA CUI, A. C.

LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN  
TELECOMUNICACIONES, SISTEMAS Y ELECTRÓNICA

INCORPORADA A LA  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
Clave 8968-66

SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA BASADO  
EN EL MOVIMIENTO DEL FLUJO DE AGUA EN  
TUBERÍAS DE AGUA POTABLE

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERA EN TELECOMUNICACIONES, SISTEMAS Y  
ELECTRÓNICA

PRESENTA

MONTSERRAT DE LA LUZ MAÑÓN GÓMEZ

ASESOR: M. EN C. JORGE EDMUNDO MASTACHE MASTACHE

ESTADO DE  
IXTLAHUACA, MÉXICO. OCTUBRE, 2019.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	4
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
AGRADECIMIENTOS .....	8
RESUMEN .....	9
SIMBOLOGÍA.....	10
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PROPUESTA DE SOLUCIÓN.....	12
1.1 Introducción.....	13
1.2 Problemática.....	16
1.3 Propuesta.....	19
1.4 Justificación.....	20
1.5 Antecedentes.....	20
1.6 Hipótesis.....	22
1.7 Objetivo General.....	22
1.8 Metodología.....	22
2. MARCO TEÓRICO.....	24
2.1 Máquinas eléctricas y transformadores.....	25
2.1.1 Clasificación de las máquinas eléctricas.....	25
2.1.1.1 Motores.....	25
2.1.1.1.1 Principio básico de funcionamiento del motor eléctrico.....	26
2.1.1.1.2 Motores de corriente directa.....	26
2.1.1.1.3 Motores de corriente alterna.....	27
2.1.1.2 Transformadores.....	28
2.1.1.2.1 Principio de funcionamiento de un transformador.....	28
2.1.1.3 Generadores.....	29
2.1.1.3.1 Principio de funcionamiento de los generadores eléctricos.....	30
2.1.1.3.2 Generadores asíncronos o de inducción.....	30
2.1.1.3.2.1 Rotor tipo jaula de ardilla.....	30
2.1.1.3.2.2 Rotor tipo bobinado.....	31
2.1.1.3.3 Generadores síncronos.....	31
2.1.1.3.4 Generador de imanes permanentes.....	31

2.1.1.3.4.1	Construcción.....	32
2.1.1.3.4.2	Principio de funcionamiento.....	32
2.1.1.3.4.3	Tipos de generadores de imanes permanentes.....	33
2.1.1.3.4.3.1	Principio de funcionamiento del generador síncrono de flujo axial.....	36
2.3	Transformación de energía.....	36
2.3.1	Interruptores electrónicos.....	38
2.3.1.1	Semiconductores.....	38
2.3.1.2	Flujo de corriente en materiales tipo n y p.....	40
2.3.1.3	Uniones básicas pn.....	41
2.3.1.4	Polarización de uniones pn.....	42
2.3.1.5	El diodo.....	43
2.3.2	Rectificadores.....	44
2.3.2.1	Clasificación de los rectificadores.....	45
2.3.2.1.1	Rectificadores de media onda.....	45
2.3.2.1.1.1	Carga resistiva.....	45
2.3.2.1.2	Rectificadores de onda completa.....	46
2.3.2.1.2.1	Rectificador en puente.....	47
2.3.3	Filtros.....	48
2.3.3.1	Principio de funcionamiento.....	48
2.3.3.2	Efecto de la resistencia de carga.....	49
2.3.3.3	Filtro de onda completa.....	50
2.4	Troceadores.....	50
2.4.1	Principio de funcionamiento.....	51
2.4.2	MOSFET.....	53
2.4.3	Fuentes de alimentación.....	54
2.4.3.1	Fuentes de alimentación lineales.....	54
2.4.3.2	Fuentes de alimentación conmutadas.....	54
2.4.3	Convertidores CD-CD.....	55
2.4.3.1	Control de convertidores de CD-CD.....	56
2.4.3.2	Convertidor Reductor (Buck).....	58
2.4.3.3	Convertidor elevador (Boost).....	61
2.5	Tecnología de baterías.....	63

2.5.1 Tipos de baterías.....	65
2.5.2 Métodos de carga.....	67
2.6 Máquinas hidráulicas.....	70
2.6.1 Clasificación.....	70
2.6.2 Turbina.....	71
2.6.2.1 Turbina hidráulica.....	71
2.6.2.1.1 Clasificación.....	71
3. DISEÑO Y SIMULACIONES.....	73
3.1 Esquema del sistema de generación de energía.....	74
3.1.1 Depósito de agua y turbina.....	75
3.2 Diseño del banco de pruebas.....	79
3.2.1 Acoplamiento mecánico.....	80
3.2.1.1 Motor.....	80
3.2.1.2 Generador de imanes permanentes.....	81
3.2.2 Sistema de control de velocidad para el banco de pruebas.....	84
3.2.3 Circuito de recuperación de energía.....	88
3.2.3.1 Emulación de generador y etapa de rectificación y filtrado.....	89
3.2.3.2 Etapa de reducción.....	90
3.2.3.3 Etapa de elevación.....	96
4. RESULTADOS.....	101
4.1 Acoplamiento mecánico.....	102
4.2 Acoplamiento electrónico.....	102
4.2.1 Control de velocidad del motor.....	103
4.2.2 Circuito rectificador y convertidor Buck.....	105
4.2.3 Convertidor Boost.....	108
5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	110
5.1 Conclusiones.....	111
5.2 Trabajos futuros.....	112
REFERENCIAS.....	113
ANEXOS.....	117

# ÍNDICE DE FIGURAS.

Fig. 1. Participación de la electricidad en el consumo final de energía por sector (porcentaje) .....	13
Fig. 2. Generación bruta de energía eléctrica. ....	13
Fig. 3. Consumo de energía en Watts por clase de hogar en México. ....	15
Fig. 4 Principio de funcionamiento de un motor .....	26
Fig. 5. Partes de un motor de corriente continua.....	26
Fig. 6. Motor de Corriente Alterna. ....	27
Fig. 7. Rotor de un motor de corriente alterna.....	28
Fig. 8. Diagrama de un transformador.....	29
Fig. 9. Tipos de rotor para máquina asíncrona.....	30
Fig. 10. Elementos de un generador simple. ....	32
Fig. 11. Generador sincrónico monofásico.....	32
Fig. 12. Imán permanente que forma parte del estator.. ....	34
Fig. 13. Imán permanente que forma parte del rotor. ....	34
Fig. 14. Campo devanado sobre el estator. Fuente: .....	34
Fig. 15. Campo devanado sobre el rotor. Fuente:.....	35
Fig. 16. Clases de generadores de imanes permanentes (flujo axial y flujo radial).....	35
Fig. 17. Estructura de un generador de flujo axial.....	36
Fig. 18. Transformación de la energía.....	37
Fig. 19. Movimiento de huecos en un semiconductor.. ....	39
Fig. 20. Flujo de corriente en un material tipo n. ....	40
Fig. 21. Flujo de corriente en un material tipo p. ....	41
Fig. 22. Unión pn.....	41
Fig. 23. Símbolo de un diodo semiconductor.....	42
Fig. 24. Polarización directa de un diodo.. ....	42
Fig. 25. Polarización inversa de un diodo.....	43
Fig. 26. Curva característica de un diodo semiconductor.....	43
Fig. 27. (a) Diodo rectificador. (b) Característica I-V. (c) Característica I-V ideal.....	44
Fig. 28. Rectificador de media onda con carga resistiva.....	45
Fig. 29. Formas de onda de tensión.....	46
Fig. 30. Rectificador en de onda completa.....	46
Fig. 31. Tensiones y corrientes del rectificador de onda completa.....	47
Fig. 32. Filtro con capacitor en la entrada sin carga en donde la salida es tensión continua. ....	49
Fig. 33. Esquema que representa el diodo abierto.....	49
Fig. 34. Filtro con capacitor a la entrada con carga.....	50
Fig. 35. La salida es la corriente directa con un pequeño rizado.....	50
Fig. 36. La onda completa de salida tiene menos rizado.. ....	50

Fig. 37. Principio de funcionamiento de un interruptor..	51
Fig. 38. MOSFET (a) tipo agotamiento canal n; (b) tipo agotamiento de canal p; (c) tipo enriquecimiento de canal n; (d) tipo enriquecimiento de canal p.....	53
Fig. 39. Conversión de CD-CD en modo conmutación.....	56
Fig. 40. Modulador por ancho de pulso. a) Diagrama de bloques. b) señales del comparador. ....	57
Fig. 41. Convertidor Buck.....	58
Fig. 42. Circuito equivalente del convertidor Buck en circuito cerrado. ....	59
Fig. 43. Circuito equivalente del convertidor Buck en circuito abierto. ....	59
Fig. 44. Evolución de las tensiones y corrientes con el tiempo en un convertidor Buck ideal.....	60
Fig. 45. Diagrama del convertidor Boost. ....	61
Fig. 46. Circuitos equivalentes de los estados del interruptor en el convertidor Boost la evolución de las tensiones y corrientes con el tiempo.....	62
Fig. 47. Reacción en una celda electroquímica.....	64
Fig. 48. Característica del método de carga con corriente semi-constante. ...	68
Fig. 49. Característica del método de carga con corriente constante.....	68
Fig. 50. Característica de Carga con voltaje-constante y corriente-constante.	69
Fig. 51. Característica del Método de Carga con voltaje constante en dos etapas .....	70
Fig. 52. Flujo de agua en la turbina de flujo cruzado.....	72
Fig. 53. Diagrama del sistema de recuperación de energía. ....	74
Fig. 54. Esquema del teorema de Torricelli.....	75
Fig. 55. Diagrama de las medidas del tinaco.....	76
Fig. 56. Relación entre la velocidad y las R.P.M. ....	79
Fig. 57. Diagrama a bloques del acoplamiento mecánico.....	80
Fig. 58. Diseño de la turbina tipo Pelton en el software SolidWorks 2018.. ....	80
Fig. 59. Diseño del banco de pruebas en el software SolidWorks 2018.....	81
Fig. 60. Estator del generador de imanes permanentes.....	81
Fig. 61. Tapa del generador de imanes permanentes.....	82
Fig. 62. Imagen del rotor e imanes permanentes del generador.....	82
Fig. 63. Voltaje del generador de imanes permanentes .....	83
Fig. 64. Diagrama a bloques del control de velocidad del motor.....	84
Fig. 65. Conexión típica del circuito generador PWM.....	84
Fig. 66. Circuito PWM en Proteus 8 Professional. ....	85
Fig. 67. Resultado de simulación del circuito de control de velocidad. ....	85
Fig. 68. Conexión típica del circuito IR2110. ....	86
Fig. 69. Diseño del circuito controlador del MOSFET en Proteus 8 Professional .....	86
Fig. 70. Resultado de la simulación del circuito activador del MOSFET. ....	87
Fig. 71. Diseño de las pistas para impresión del circuito controlador de velocidad .....	87

Fig. 72. Modelo 3D del circuito de control de velocidad en Proteus Professional 8. ....	88
Fig. 73. Conexión de diodo en antiparalelo a la carga. ....	88
Fig. 74. Diagrama de bloques del circuito de recuperación de energía. ....	89
Fig. 75. Etapas del circuito de recuperación de energía diseñado en el software PSIM. ....	89
Fig. 76. Simulación del generador de imanes permanentes, etapa de rectificación y filtrado en PSIM. ....	90
Fig. 77. Circuito de la etapa de reducción en PSIM. ....	90
Fig. 78. Conexión típica del circuito integrado AD8406. ....	91
Fig. 79. Señales de voltaje y corriente en la simulación del convertidor Buck a través del MOSFET. ....	93
Fig. 80. Señales de voltaje y corriente en la simulación del convertidor Buck a través del diodo. ....	93
Fig. 81. Señales de voltaje y corriente en la simulación del convertidor Buck a través del inductor. ....	94
Fig. 82. Diseño del circuito rectificador con filtro y el convertidor Buck implementado en el software Altium Designer. ....	94
Fig. 83. Diseño de las pistas para su implementación en placa fenólica en Altium Designer. ....	95
Fig. 84. Modelo 3D del circuito rectificador con filtro y el convertidor Buck. ...	95
Fig. 85. Circuito de la etapa de elevación en PSIM. ....	96
Fig. 86. Conexión típica del circuito integrado MT3608. ....	96
Fig. 87. Señales de voltaje y corriente en la simulación del convertidor Boost a través del MOSFET. ....	99
Fig. 88. Señales de voltaje y corriente en la simulación del convertidor Boost a través del diodo. ....	99
Fig. 89. Señales de voltaje y corriente en la simulación del convertidor Boost a través del inductor. ....	100
Fig. 90. Implementación del acoplamiento mecánico. ....	102
Fig. 91. Acoplamiento electrónico. ....	103
Fig. 92. Circuito de control de velocidad implementado con tecnología THT. ....	103
Fig. 93. Conexión del MOSFET y diodo de libre rodada. ....	104
Fig. 94. Señal de salida del circuito de control de velocidad. ....	104
Fig. 95. Salida del generador de imanes permanentes a 434 r.p.m. ....	105
Fig. 96. Circuito rectificador y convertidor Buck en placa fenólica. ....	105
Fig. 97. Señal de salida del rectificador puente de diodos. ....	106
Fig. 98. Señal de salida del filtro compuesto por capacitores. ....	107
Fig. 99. Señal de salida del convertidor Buck. ....	107
Fig. 100. Módulo MT3608 (Convertidor Boost). ....	108
Fig. 101. Señal de salida del convertidor Boost. ....	108
Fig. 102. Banco de pruebas y circuitos electrónicos. ....	109



# ÍNDICE DE TABLAS.

TABLA I. Gasto trimestral en pesos en electricidad según deciles de hogares de acuerdo con su ingreso corriente total trimestral. Fuente: INEGI, (2014).....	14
TABLA II. Dotación diaria por persona en un día. Fuente: A. García, (2012).....	18
TABLA III. Diámetro de las tuberías mínimas para el buen funcionamiento de los muebles para servicio de agua fría. Fuente: A. García, (2012).....	18
TABLA IV. Características de los tipos de baterías. Fuente: M. Vergara, 2016. ....	67
TABLA V. Relación de la velocidad del agua en las tuberías respecto a la capacidad del tinaco. Fuente Propia .....	76
Tabla VI. Relación de litros por minuto de agua que descienden por las tuberías al realizar algunas actividades. Fuente propia .....	77
Tabla VII. Resultados de generador de 10 polos. Fuente: Mastache, J. (2016)....	82

# AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente a mis papás por ser los principales promotores de mis sueños, gracias a ellos por cada día confiar, creer en mí y en mis expectativas; les agradezco por el gran amor y devoción que tienen a nuestra familia, por haberme formado como una persona de bien; gracias por siempre desear y anhelar siempre lo mejor para mi vida, gracias por cada consejo y por cada una de sus palabras que me han guiado a lo largo de mi vida. Gracias por su esfuerzo y dedicación me ayudaron a culminar mi carrera universitaria, con su ejemplo y el apoyo suficiente para no decaer cuando todo parecía complicado e imposible. Mamá y Papá, esta Tesis se las dedico con todo mi corazón.

Asimismo, agradezco con todo mi cariño a mis hermanos, que con sus palabras me hacían sentir orgullosa de lo que soy y de lo que les puedo enseñar. Ojalá algún día yo me convierta en su fuerza para que puedan seguir avanzando en su camino.

Agradezco con una gran admiración a mi asesor M. en C. Jorge Edmundo Mastache Mastache quien, con su gran trayectoria, experiencia, conocimiento, enseñanza y motivación me orientó en la investigación. Usted me enseñó que incluso la tarea más grande se puede lograr si se hace un paso a la vez. Gracias por su apoyo y paciencia pese a las adversidades e inconvenientes que se presentaron.

Gracias a todos mis docentes y directivos que, con su sabiduría, conocimiento y apoyo, motivaron a desarrollarme como persona y profesionalmente, quienes supieron impartir sus conocimientos con mucho esfuerzo y dedicación.

Finalmente, un eterno agradecimiento a la Universidad de Ixtlahuaca CUI la cual abre sus puertas a jóvenes como yo, preparándonos para un futuro competitivo y formándonos como personas de bien.

# RESUMEN

La producción de energía es un factor importante para el desarrollo de actividades productivas, de transformación y servicios en el país, cuya generación y consumo incrementa año con año, lo que conlleva a una implementación de nuevas tecnologías, donde las energías limpias tienen una baja participación.

De las fuentes alternativas, la energía hidroeléctrica presenta una reducción en su producción, por lo que esta situación presenta una oportunidad para el desarrollo de nuevos sistemas de generación de energía hidroeléctrica.

En el presente trabajo se desarrolló un banco de pruebas basado en un sistema de recuperación de energía, el cual consiste en simular el flujo de agua que existe en las baterías para así generar energía eléctrica a través de un generador de imanes permanentes conectada a una turbina, ésta es emulada a través de un motor de CD cuya velocidad es controlada bajo la técnica de modulación PWM, a través de un troceador controlado y acoplado con un driver controlador de compuerta para conmutar la fuente de entrada a través del MOSFET semiconductor para el switcheo, emulando así a través de la potencia reflejada a la carga la velocidad de giro de una turbina.

La conexión de suministro genera una corriente alterna (CA) y los dispositivos requieren corrientes continuas (CD). La conversión de potencia permite que dispositivos de corriente continua utilicen energía de fuentes de corriente alterna, por lo que se integra un módulo rectificador con filtro.

Se seleccionaron las topologías de convertidores basados en fuentes conmutadas por las carencias y características de las fuentes de alimentación lineales donde para poder suministrar a la salida la potencia deseada, se tiene que sobre dimensionar la fuente y potencia de entrada optando así, por las fuentes conmutadas por presentar alta eficiencia y poca pérdida de potencia.

Para estabilizar la señal de salida el rectificador se añade un convertidor Buck, que es fuente de alimentación conmutada, el cual permite reducir el voltaje a 5V.

Después se integrará otra fuente de alimentación conmutada, un módulo convertidor de potencia Boost (convierte energía CD a CD), obteniendo una salida de tensión continua mayor que su entrada, esta energía podrá ser almacenada en baterías y así prender alguna lámpara o algún otro dispositivo, permitiéndonos así ahorrar una parte de la energía que se consume al transportar el agua hasta el tinaco.

# SIMBOLOGÍA

GEI	Gases de Efecto Invernadero
Wh	Watts hora
GWh	Gigawatts hora
CA	Corriente alterna
CD	Corriente directa
$t$	Tiempo
$V_{in}$	Voltaje de entrada
$V_O$	Voltaje de salida
$L$	Inductor
KWh	Kilowatts hora
FCEM	Fuerza contraelectromotriz
FEM	Fuerza electromotriz
$F$	Fuerza magnética
$I$	Corriente eléctrica
$l$	Longitud
$\varphi$	Flujo magnético
$\varphi_f$	Flujo magnético de fuga
$\varphi_m$	Flujo magnético común
$\vec{B}$	Campo magnético
$\varepsilon$	Tensión inducida
FMM	Fuerza magnetomotriz
$R$	Resistor
$C$	Capacitor
$\omega$	Velocidad angular
$f$	Frecuencia
$n_s$	Velocidad de sincronismo
$p$	Número de polos
eV	Electronvoltio
Si	Silicio
Ge	Germanio
$t_{rr}$	Tiempo de recuperación inversa
K	Constante
T	Periodo
$E_{m\acute{a}x}$	Voltaje máximo
$\delta$	Ciclo de trabajo
VRMS	Voltaje eficaz
$P_{in}$	Potencia de entrada
$P_O$	Potencia de salida
$R_O$	Resistencia de salida
ns	Nanosegundos
c	Capacidad
$I_O$	Corriente de salida

$V_{pp}$	Voltaje de rizo de salida
$V_{QON}$	Voltaje en estado encendido del MOSFET
$+v_s$	Voltaje de semiciclo positivo
$-v_s$	Voltaje de semiciclo negativo
$R_L$	Resistencia de carga
$V_p$	Voltaje pico
$i_D$	Corriente instantánea en el diodo
$V_g$	Voltaje de encendido del Chopper
$\widehat{V}_{st}$	Voltaje pico del diente de sierra
$V_{control}$	Voltaje de control
$V_B$	Voltaje de entrada de los convertidores
$g$	Gravedad
$h$	Altura
$Q$	Caudal
$S$	Sección
$v$	Velocidad
$r$	Radio
R.P.M.	Revoluciones por minuto
$d$	Diámetro
$n$	Ciclos por minuto
$T_{ON}$	Tiempo de conducción/encendido
$T_{OFF}$	Tiempo de bloqueo/apagado

# 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PROPUESTA DE SOLUCIÓN.

Se presenta un estudio sobre el contexto de la energía eléctrica en el país actualmente; los índices de generación de energía, así como el consumo de ella por sector y la aportación trimestral de la población al pago de este servicio. También se presenta la disminución de la producción de energías renovables debido principalmente a una reducción en la generación de energía hidroeléctrica.

De igual forma, se menciona que el Estado de México es el mayor consumidor de energía del país, donde el pago por este servicio representa el segundo gasto de consumo total en las viviendas y tomando en cuenta que el sector energético es dominado por las fuentes no renovables de energía, es necesario la producción de nuevas formas de generación de energía eléctrica.

Por lo que en este capítulo se plantea un sistema de generación de energía eléctrica a través de la instalación de una turbina en las tuberías de agua potable de los edificios que descienden desde el depósito de agua; esta propuesta contribuye al medio ambiente puesto que no genera ningún desecho, además apoya la economía de la sociedad al tener una fuente de energía externa y así disminuir la aportación monetaria por el pago del servicio.

## 1.1 Introducción.

La mayor demanda energética, sin importar que sean actividades relacionadas con la producción, la movilidad de personas o la satisfacción de necesidades al interior de los hogares, contribuye, en mayor o menor medida, a la contaminación del medio ambiente, la generación de GEI (Gases de Efecto Invernadero) y la afectación a la salud de las personas. [1]

En la última década, la industria eléctrica registró tasas de crecimiento positivas, siendo la segunda fuente de energía de mayor consumo en México, con una participación de 18% de consumo energético total del país.

Representando el 23% del consumo de energía en el sector agropecuario, el 35% en la industria y el 30% del consumo total en los sectores residencial, comercial y público. La Fig. 1 muestra la gráfica del consumo de energía en cada sector.

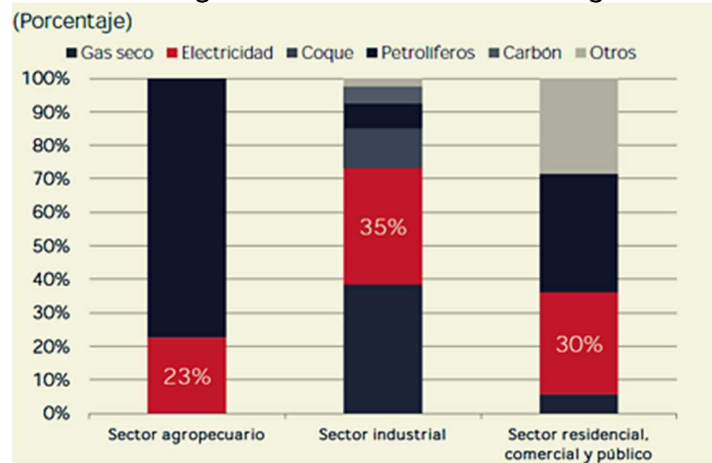


Fig. 1. Participación de la electricidad en el consumo final de energía por sector (porcentaje). Fuente: SENER, (2016).

En el año 2015, se generaron 309,553 GWh de energía eléctrica, 2.7% más que en el 2014. Del total de la energía generada, el 79.7% proviene de las tecnologías convencionales y sólo el 20.3% pertenece a las tecnologías limpias como se muestra en Fig. 2.

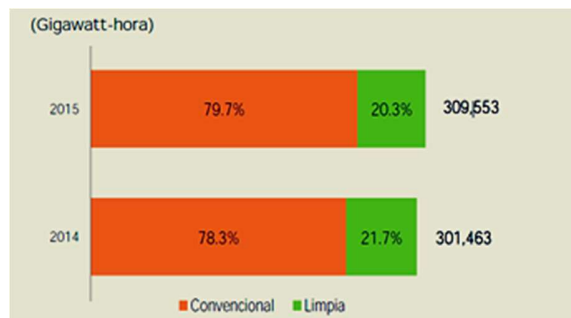


Fig. 2. Generación bruta de energía eléctrica. Fuente: SENER, (2016).

Las energías limpias registraron una disminución de 3.7% en su producción, debido principalmente a una reducción en la generación hidroeléctrica, teniendo un 20.6% por debajo de la energía producida en el 2014. En cambio, la generación de las

centrales eólicas, cogeneración eficiente y nucleoelectricas incrementaron su producción en 36.1% 31.2% y 19.6% respectivamente. [2]

Del total de los usuarios del Sector Eléctrico, en la región centro del país se concentra el mayor porcentaje de beneficiarios por este servicio público. Siendo el 29.0% (11,143, 758 usuarios) del total del consumo energético a nivel nacional.

De acuerdo con la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares 2014, los hogares en el país destinan 1.5% de su ingreso trimestral al pago del servicio de energía eléctrica. La encuesta indica que en el decil 1, que es el ingreso más bajo, se gasta en promedio \$168 pesos por pago de la electricidad, que representa el 2.7% de su ingreso total trimestral; mientras tanto el decil 10, que es el ingreso más alto, el gasto promedio por pago de electricidad es de \$1,504 pesos, representando el 1.1% de su ingreso trimestral (véase Tabla I).

*TABLA I. Gasto trimestral en pesos en electricidad según deciles de hogares de acuerdo con su ingreso corriente total trimestral. Fuente: INEGI, (2014).*

<b>Decil</b>	<b>Gasto trimestral en electricidad por hogar (en pesos)</b>	<b>Ingreso destinado a pago de electricidad (%)</b>
1	167.6	2.7
2	265.1	2.4
3	328.9	2.2
4	328.7	1.7
5	396.0	1.7
6	504.2	1.8
7	525.4	1.5
8	694.3	1.6
9	861.4	1.4
10	1,504.3	1.1
<b>Promedio</b>	<b>557.6</b>	<b>1.5</b>

La energía eléctrica representa el segundo gasto de consumo total en las viviendas, junto con el agua, gas y otros combustibles según la Encuesta Nacional de los Hogares realizada por el INEGI. [3]

El Estado de México tuvo el mayor número de consumidores de energía eléctrica, con un promedio de 4,367,444 usuarios mensuales, ocupando así el primer lugar a nivel nacional de consumo de energía eléctrica; donde tan solo el 25% de este gasto, se deriva de las más de cuatro millones de hogares que alberga la entidad.

Por hogar se entiende el conjunto de personas que pueden ser o no familiares, que comparten la misma vivienda y se sostienen de un gasto común.

Existen distintos tipos (por su ubicación: urbanos, mixtos y rurales; por el estrato socioeconómico: alto, medio-alto, medio-bajo y bajo; por su composición: nucleares,



ampliados, corresidentes y unipersonales) y exhiben patrones diferenciados de consumo.

La demanda absoluta de los hogares urbanos fue más elevada en los estratos medio-bajo y medio-alto, concentrando 72.1 por ciento, como resultado del gran volumen de hogares que los integran; esto se aprecia en el consumo promedio por hogar, el cual muestra que el estrato alto demandó más energía. Por su parte, los hogares rurales de estrato medio-bajo y bajo consumieron 99.3 por ciento del total en este ámbito.

El consumo promedio de energía según el tamaño de localidad fue más alto en los hogares corresidentes de localidades mixtas, mismos que superaron a los ampliados de las localidades urbanas; ello estaría influido por el marco muestral de la encuesta, dado que 45 de 125 municipios con localidades mixtas eran metropolitanos, principalmente del Valle de México y Cuernavaca (véase Fig. 3).

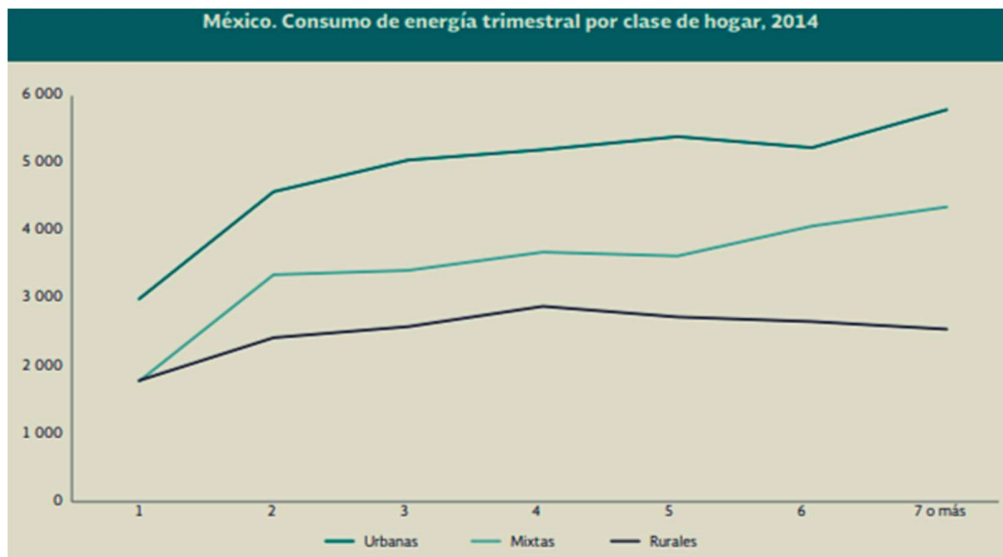


Fig. 3. Consumo de energía en Watts por clase de hogar en México. Fuente: A. Franco y M. Velázquez, (2014).

Conforme aumentan los integrantes, la energía utilizada en el hogar también tiende a incrementarse, aunque de manera marginal, lo cual estaría relacionado con el uso de espacios comunes que suponen que se comparta o se use simultáneamente la energía (por ejemplo, la luz de la sala, el comedor), con todo y las necesidades o usos específicos de cada uno de los integrantes del hogar (entretenimiento, actividades escolares, cocción de alimentos, limpieza, etc.).

En las viviendas urbanas, 78.3 por ciento de la energía usada se empleó en las actividades cotidianas. El consumo absoluto fue mayor en aquellas con un solo hogar compuesto por entre tres y cinco personas, de los estratos socioeconómico medio-bajo y medio-alto. Las viviendas rurales ocuparon el segundo lugar en el uso de energía, y, al igual que en las urbanas, el consumo se concentró en las

compuestas por entre tres y cinco miembros, no obstante, 99.2 por ciento del consumo total se agrupó en los estratos medio-bajo y bajo.

Es por esto que el trabajar con energías renovables es un campo de acción que se puede explotar para dar solución a estos altos índices reportados en las referencias.

## **1.2 Problemática.**

De acuerdo a la información investigada en el Balance Nacional de Energía del año 2017 por la Secretaría de Energía, se pudo concluir que la energía eléctrica es un factor fundamental para la realización de actividades en cualquier sector, siendo la segunda fuente de energía de mayor consumo. [4]

Donde la generación y el consumo de ella ha ido en aumento año con año en México, esto conlleva a una implementación de más tecnologías, de las cuales las energías convencionales tienen el mayor porcentaje de la generación total con un 79.7% y las energías limpias sólo cumplen con el 20.3%, de la cual la generación de energía hidroeléctrica presentó una disminución en su producción.

En la parte centro del país se presenta el mayor consumo de esta energía, en donde el Estado de México ocupa el primer lugar. De esta energía el principal consumidor fueron los hogares urbanos, siendo el estrato medio-alto y medio bajo los que demandaron mayor energía.

La demanda de energía eléctrica representa un gasto en los hogares mexicanos, el cual es el segundo gasto de consumo total de las viviendas, mismo del cual los usuarios destinan el 1.5% de su ingreso trimestral al pago del servicio, que en el ingreso más bajo se gastan \$168 pesos en el pago de la electricidad siendo el 2.7% de su ingreso total del trimestre y conforme aumenta el ingreso el gasto promedio en la electricidad es de \$1,504 pesos.

Dichas cifras según las encuestas van aumentando de acuerdo a las personas que viven en los hogares, puesto que utilizan la energía para actividades cotidianas y por lo tanto los usuarios destinan una mayor parte de su ingreso trimestral hacia al pago de la electricidad. [4]

El consumo de energía eléctrica en el Estado de México tiene un impacto crucial en la economía de los habitantes del mismo, ya que de sus ingresos trimestrales aportan un porcentaje importante para el pago del servicio hacia la compañía de luz, mismo que cada vez va aumentando considerablemente y por lo tanto el gasto que las familias mexicanas realizan por el consumo de la energía eléctrica cada trimestre se ve afectado puesto que el costo es cada vez más elevado.

El sector energético, dominado por las fuentes no renovables de energía, ha jugado un papel decisivo para el desarrollo económico de México por su clara influencia sobre todo en el aparato productivo del país. Si bien toda la sociedad requiere,

ineludiblemente, producir y consumir la energía para sus procesos productivos, es importante considerar que los patrones de producción y consumo de energía tienen incidencia en las transformaciones del medio ambiente.

Las fuentes energéticas de mayor impacto al ambiente son el carbón mineral y los hidrocarburos los cuales afectan principalmente a los cuerpos de agua, suelos y vida silvestre, así como a la salud humana. [5]

En la búsqueda de nuevas fuentes de energía, se han encontrado diversas fuentes renovables y amigables con el planeta, es por eso que se decide investigar sobre las fuentes de Energía Renovables, las cuales demuestran ventajas realmente esperanzadoras frente a las energías más empleadas actualmente. El constante e impredecible cambio climático de la actualidad, nos ha llevado a realizar ciertos cambios en nuestro modo de ver y vivir la vida, algunos de estos cambios se han sido en la búsqueda de nuevas fuentes de energía, que no contengan emisiones al medio ambiente y sean renovables, también conocida como Energías Verdes.

La energía hidroeléctrica, también conocida como energía hídrica o hidráulica, es una de las fuentes de energía más conocida y utilizada en la historia de la humanidad. Este tipo de energía es la que se obtiene del simple movimiento del agua, tanto de ríos como mares, lagos o lagunas.

Al desplazarse, el agua lo hace con una potencia de fuerza de gran nivel por lo cual el ser humano entendió desde temprano en el tiempo que esa energía o potencia podía ser utilizada para el funcionamiento de diferentes cosas. La energía hidroeléctrica, además de ser accesible para casi todos los países pues se puede aprovechar desde casi todos los cursos de agua, es renovable, lo cual quiere decir que no contamina ni desgasta recursos no renovables como el petróleo.

En otros términos, significa aprovechar una fuerza que se produce naturalmente. El uso de la energía hidroeléctrica es una de las formas de energía más antiguas utilizadas por el ser humano, desde los molinos de agua que se usaban en la temprana Edad Media y permitían beneficiarse de la existencia incluso de un pequeño arroyo.

El diseño de una instalación hidráulica de agua fría en un edificio comprende la cantidad de agua necesaria para alimentos, servicios sanitarios, calefacción, aire acondicionado, fabricación y protección contra incendio. Una vez conocida la cantidad total requerida, se procede a determinar la capacidad de tanques, cisternas, bombas, tuberías y accesorios. La cantidad de agua necesaria se determina por medio del consumo promedio que requiere una persona al día, el valor que se le da incluye: aseo personal, alimentos y demás necesidades. La Tabla II contiene la cantidad de agua promedio que gasta una persona de acuerdo con el tipo de construcción. [6]

TABLA II. Dotación diaria por persona en un día. Fuente: A. García, (2012).

Tipo de construcción	Litros por persona al día
Viviendas de 100 m <sup>2</sup> construidos	150
Viviendas de más de 100 m <sup>2</sup> construidos	200
Albergues y Casas de Huéspedes	300
Hoteles y Moteles	300
Orfanatos y Asilos	300
Ejército, Policía y Bomberos	200
Oficinas	50

Una instalación hidráulica se puede definir como el conjunto de tubos, muebles, accesorios (válvulas, codos y conexiones) y equipo (calentadores, bombas, hidroneumáticos) unidos para llevar en forma adecuada el suministro de agua fría y caliente a una edificación.

El diseño de una instalación de agua está en función del gasto y la presión que se requiere en cada mueble. En la Tabla III se muestra la cantidad de agua y una presión media mínima que debe llegar a los distintos muebles, con estos valores podemos determinar si el diseño de la instalación cumple con el gasto mínimo que debe llegar a cada mueble.

TABLA III. Diámetro de las tuberías mínimas para el buen funcionamiento de los muebles para servicio de agua fría. Fuente: A. García, (2012).

Mueble	Diámetro de la tubería (pulgadas)	Presión ( $kg/cm^2$ )	Caudal (litros por minuto)
Lavabo	3/8	0.58	12
Lavabo público	3/8	0.73	15
Fregadero	1/2	0.36	15
Bañera	1/2	0.36	25
Lavadero	1/2	0.36	20
Ducha	1/2	0.58	20
W.C. con tanque de descarga	1/2	0.58	12
Mingitorio	1	1.09	60
Manguera de jardín 15m	1/2	2.19	20

Estos resultados, nos permiten comprobar que las velocidades en las distintas instalaciones de acuerdo al número de habitantes tienen la capacidad de mover una pequeña turbina instalada en las mismas tuberías para así aprovechar las Energías de Presión, Cinética y Potencial que existen naturalmente en los contenedores de agua y en las mismas tuberías por donde fluye el líquido las cuales son desperdiciadas en todas las instalaciones puesto que no se hace ninguna utilización de las mismas.

## 1.3 Propuesta.

En el desarrollo del proyecto se presentó un dispositivo funcional como banco de pruebas, con el cual se emula el flujo de agua potable que desciende en las tuberías y gracias a una turbina que transforma la energía mecánica a eléctrica debido a el acoplamiento de un generador de imanes permanentes a través de un motor conectado a una flecha, que en una siguiente etapa se conectó un circuito de control y potencia para recuperar energía del proceso mecánico.

La conexión de suministro genera una tensión alterna y debido a que el almacenamiento se llevará a cabo en baterías, estas requieren tensiones continuas, por lo tanto, dicha tensión pasará por un módulo convertidor de CA (corriente alterna) a CD (corriente directa). Esta conversión permite que dispositivos de corriente continua utilicen energía de fuentes de corriente alterna.

A la salida del convertidor CA a CD se añadió un módulo convertidor de potencia Buck, el cual es un convertidor reductor el cual presenta la propiedad de siempre tener un voltaje menor a la salida en comparación con la entrada, esto debido al switcheo del transistor el cual en el instante  $t = 0$  comienza a conducir el interruptor semiconductor de potencia, formando dos subcircuitos equivalente de esta etapa donde  $V_o$  es menor que  $V_{in}$  y la corriente que circula por el inductor  $L$  será creciente durante el intervalo del tiempo de encendido. Posteriormente en el tiempo apagado se genera entonces una sobretensión que hace conducir al diodo en polarización directa generando un nuevo subcircuito que provoca que la energía almacenada en el inductor se reste con el voltaje de alimentación del convertidor.

Después se integró un módulo convertidor de potencia Boost el cual es un elevador de tensión que consiste en convertir energía CD a CD, obteniendo una salida de tensión continua mayor a su entrada, es un tipo de fuente de alimentación conmutada que contiene al menos dos interruptores semiconductores (diodo y transistor); y al menos un elemento inductivo para almacenar energía que del mismo modo al pasar a un estado de encendido el interruptor de potencia carga un inductor el tiempo definido por el ciclo de trabajo y en el tiempo de apagado este se suma al nivel de referencia de entrada provocando la elevación de voltaje a la salida del convertidor. [7]

Esta energía al ser almacenada en baterías podrá ser utilizada para prender alguna lámpara o algún otro dispositivo, permitiéndonos ahorrar una parte de la energía que se consume al transportar el agua hasta el tinaco o al tener una falla eléctrica poder utilizarlo como respaldo y fuente alternativa encendiendo una recámara o cargando un dispositivo móvil.

## **1.4 Justificación.**

El presente trabajo servirá como base para futuros proyectos con el fin de ahorrar una parte de la energía que es consumida diariamente en los hogares, ya que toda estructura arquitectónica cuenta con una distribución de agua potable a través de tuberías, la cual se mantiene en constante movimiento por las actividades cotidianas que se realizan como lavarse las manos, bañarse, lavar la ropa, etc., éste movimiento no es aprovechado, por lo que se pretende recuperar esta energía a través de un sistema electromecánico, donde estaremos generando energía sin ningún tipo de daño al medio ambiente y sin uso de alguna fuente externa.

Igualmente contribuirá a la economía de la población mexicana ya que la recuperación de la energía disminuirá el costo que las familias mexicanas aportan a la compañía de luz por el uso de la energía eléctrica, también contribuirá al medio ambiente puesto que se considera una energía limpia porque no produce ningún desecho hacia el medio ambiente.

Este banco de pruebas es el punto de partida para una línea de investigación de energías propuesta en la Universidad con la cual se desarrollarán investigaciones relacionadas con la implementación, el control, automatización o la optimización de dicho prototipo.

## **1.5 Antecedentes.**

En las referencias de diseños mecánicos se presentan trabajos relacionados a microturbinas que usan el agua de las tuberías para generar energía. En el año 2014, la empresa Flat Tower Ideas diseñó la primera microturbina capaz de generar electricidad a partir de la presión residual en tuberías de agua.

El dispositivo se instalaba al final de la tubería general de un edificio o finca agrícola, donde podía llegar a alcanzar un alto rendimiento eléctrico del 60%, comparado con los rendimientos de cualquier tipo de central eléctrica habitual. Además, en su punto óptimo, era capaz de generar 1.2 KWh de energía eléctrica para caudales de 10 litros por segundo. [8]

Los creadores idearon este dispositivo pensando en zonas aisladas y deslocalizadas donde el precio de la energía eléctrica es muy elevado. Por lo tanto, su aplicación principal es la agricultura donde abundan tuberías de gran caudal. Actualmente, la energía recuperada en estas explotaciones es suficiente para encender las electroválvulas de las tuberías o alimentar los motores de riego.

La microturbina de Flat Tower Ideas se asemeja a este proyecto puesto que es una turbina instalada directamente en las tuberías de los edificios pero lo que lo diferencia de este es que ocupan los desechos residuales de los mismos, en cambio

en este proyecto se emuló el comportamiento del agua potable que desciende de los tanques instalados en las casas habitación.

En 2014 la empresa Traxco desarrolló una turbina de reducidas dimensiones, para insertar en tuberías de 2" (50.8mm de diámetro) y de 3" (76.2mm de diámetro) que genera 1 KWh con un caudal de 10 litros por segundo, necesitando y ocasionando una pérdida de carga o pérdida de presión de tan sólo 2 Kg/cm<sup>2</sup>. [9]

Trabaja a partir de 0.8 Kg/cm<sup>2</sup> de presión y hasta un máximo de 8 Kg/cm<sup>2</sup> y el mismo equipo se regula automáticamente para cargar y acumular la electricidad generada en baterías tanto si son de 12, 24, o 48V. En 12V genera una potencia máxima de entre 0.5 y 0.8 KW, en 24V de 0.8 a 1.2 KW y en 48V de 1.5 KW.

El fluido que circula por la mini turbina procedente de la tubería de entrada, es devuelto a la instalación por la tubería de salida, mermando un leve porcentaje de presión con respecto a la presión de entrada y con una generación de energía eléctrica que será proporcional a las condiciones hidráulicas de caudal y presión presentes en la instalación.

La diferencia que dicha turbina tiene con el presente proyecto, es la ausencia de una fuente externa, ya que funciona a través de un generador de imanes permanentes, quienes poseen la capacidad de siempre estar imantado y así poder generar una energía alterna producida por el movimiento de agua en las tuberías, mientras que la mini turbina de la empresa Traxco tiene que tener una fuente alterna para su funcionamiento.

Otro trabajo es el presentado con el título "Prototipo De Generación De Energía A Partir De Investigación Y Desarrollo Tecnológico En Tecnologías Alternativas"

En el proyecto presentado por Jairo Andrés Bermúdez Jáuregui y Jhonny Jair Pedraza Soler [10] se propone el desarrollo de un generador de energía eléctrica, por medio de la utilización de unos elementos no convencionales como lo son los imanes de neodimio. Estos imanes, poseen un gran campo magnético así lo afirma Víctor M. Luna Trillo [11] en su estudio cuantitativo de imanes permanentes, el cual podemos aprovechar mediante una configuración mecánica (por medio de engranajes), para transmitirle ese movimiento circular a un motor generador de imanes permanentes de corriente continua, quien va a transformar la energía rotacional o mecánica, en energía eléctrica para ser almacenada en una baterías de ion-Litio, donde, por medio de un inversor, va a ser convertida de CD a AC, y con ello, ser utilizada para la conexión de diferentes aparatos eléctricos o electrónicos de bajo consumo.

Este prototipo se relaciona con el presente proyecto puesto que de igual forma se utilizaron los imanes de neodimio en un generador para recuperar la energía eléctrica y ésta será almacenada en baterías para su uso posterior en aparatos electrónicos.

En el proyecto de tesis “Diseño E Implementación De Un Prototipo De Un Generador Magnético Aprovechando La FCEM Como Energía Alternativa” presentado por Lenin Moises Quispe Arapa y Rossel Apaza Bruno [12] se diseña un prototipo estudiando el comportamiento de los diferentes tipos de generadores eléctricos que existen en la actualidad, ya sea con imanes permanentes o con electroimanes, también se estudió otros tipos de generadores no convencionales como eólicos, fotovoltaicos, biomasa, marina, geotérmica etc. Además, un sistema de generación de energía basado en pulsos electromagnéticos o fuerza contraelectromotriz (FCEM) que se basa en la generación de energía mediante el aprovechamiento del campo magnético de los electroimanes.

Una vez estudiado las diferentes formas de generación de energía, se comenzó con el estudio detallado de la generación de energía aprovechando la FCEM que no es más que la energía que retorna del campo magnético a la bobina, la FCEM tiene la característica de tener amplitud de voltaje alto, los cuales son aprovechados para almacenarlos en una batería. Para aprovechar esta FCEM se construyó un prototipo de generador tipo radial que se alimenta por una batería, este prototipo consta de un rotor con imanes permanentes, un estator con electroimanes y un circuito electrónico capaz de direccionar la energía de la FCEM hacia las baterías. [12]

El prototipo planteado en esta tesis se relaciona con el trabajo anterior en el principio fundamental del estudio de los tipos de generadores eléctricos relacionados a los imanes permanentes, así como el almacenamiento de la energía generada en baterías que el objetivo de este proyecto.

## **1.6 Hipótesis.**

Si se puede desarrollar un dispositivo electromecánico como banco de pruebas que emule el aprovechamiento del movimiento generado en tuberías de agua potable, entonces se podrá generar energía eléctrica para almacenarla en baterías para apoyar el consumo de la energía eléctrica en el hogar.

## **1.7 Objetivo General.**

Desarrollar un dispositivo electromecánico como banco de pruebas capaz de generar energía eléctrica, emulando el comportamiento del flujo de agua en tuberías y un conjunto de convertidores para su almacenamiento en baterías.

## **1.8 Metodología.**

El presente trabajo propone el desarrollo de un banco de pruebas que constó de un motor que emuló una turbina que se pretende instalar en el sistema hidráulico de los hogares, este sistema se acopló por medio de una flecha a un generador de imanes permanentes, el cual está conectado a una etapa de potencia y



posteriormente a un circuito electrónico para su almacenamiento en baterías, para así cumplir el objetivo general de este proyecto, donde se implementó un tipo de metodología basada en el método científico.

Este método comprende un conjunto de técnicas y procedimientos para la obtención de un conocimiento teórico con validez y comprobación científica mediante el uso de instrumentos fiables que dan lugar a la subjetividad desarrollado por Mario Bunge. [13]

FASE A: la primera etapa del método científico es la observación, en este caso se describirán las variables a controlar:

El primer paso de la investigación fue diseñar y establecer como componente electromecánico el generador de imanes permanentes, el cual consta de un conjunto de imanes que “se mueven” frente a unas bobinas “fijas”. [14]

En este generador síncrono se ha sustituido el bobinado de excitación se produce la inducción del estator mediante imanes permanentes, los cuales generan el campo magnético. Este generador síncrono está sustituyendo poco a poco a los de rotor bobinado produciendo una señal senoidal variante en amplitud y frecuencia.

Esta forma de onda senoidal fue generada gracias al sistema mecánico que emulaba el comportamiento del flujo de agua que atravesaba las tuberías de alimentación y producía el movimiento hacia una turbina de acoplamiento.

Para generar una señal de corriente continua para el almacenamiento de baterías se tiene que modificar la señal producida por el generador de imanes permanentes la cuál pasará a una etapa de rectificación que transforma la corriente alterna a corriente directa. La rectificación de tensiones y corrientes CA se realiza por medio de un puente de diodos. [15]

La siguiente etapa es la de elevación de potencia, la cual consta de dos convertidores un convertidor Buck y un convertidor Boost, donde se utilizarán como fuentes conmutadas para reducir y elevar la tensión proveniente del generador de imanes permanentes ratificado, los cuales usan las características del inductor y el capacitor como elementos almacenadores de energía para elevar o disminuir la tensión proveniente de la fuente de alimentación y usar la potencia almacenada para inyectarla al capacitor, produciendo así niveles de voltaje mayores o menores en la carga [7]

FASE B: En la segunda etapa del método científico se desarrolla la hipótesis en donde se explica el hecho observado para dar paso a la etapa de experimentación.

FASE C: En la última etapa del proyecto se refutará la hipótesis a través de la experimentación y el testeado de los convertidores bajo condiciones de máxima potencia o máximos esfuerzos y se presentarán los resultados obtenidos, así como las conclusiones y observaciones del prototipo.

## 2. MARCO TEÓRICO.

En este capítulo se abordan los fundamentos teóricos sobre máquinas eléctricas, transformación de energía, troceadores, tecnología de baterías y máquinas hidráulicas para el diseño y desarrollo del sistema de generación de energía, que sirven como soporte para el desarrollo de este trabajo.

El marco teórico de igual forma, permite la interpretación de los resultados y la formulación de las conclusiones reportadas en los capítulos siguientes.

## 2.1 Máquinas eléctricas y transformadores.

Una máquina eléctrica es un dispositivo capaz de convertir energía mecánica en energía o viceversa. Cuando el dispositivo convierte energía mecánica en energía eléctrica se denomina generador; cuando convierte energía eléctrica a mecánica se denomina motor. La mayoría de motores y generadores convierten de una energía a otra a través de campos magnéticos. [16]

El transformador es un dispositivo eléctrico cuyo objetivo es convertir energía eléctrica de corriente alterna (CA) de un nivel de voltaje dado a otro nivel de voltaje. Como los transformadores operan con la acción de un campo magnético para cambiar el nivel de voltaje, por lo general se definen junto con los generadores y motores.

### 2.1.1 Clasificación de las máquinas eléctricas.

Las máquinas eléctricas se clasifican de acuerdo al tipo de energía eléctrica que transforman, esta clasificación es [17]:

- a) **Motores:** transforman energía eléctrica en mecánica, al introducir una corriente en la máquina a través de una fuente de alimentación externa. Esta corriente entra en contacto con un campo magnético inductor que produce el movimiento de la máquina
- b) **Transformadores:** transforman energía eléctrica CA con un nivel de tensión y corriente determinados en otra energía eléctrica CA con magnitudes de tensión y corriente distintos.
- c) **Generadores:** transforman energía mecánica en eléctrica por el movimiento de una bobina en un campo magnético el cuál produce una fuerza electromotriz (FEM) aprovechada en el exterior.

#### 2.1.1.1 Motores.

El motor eléctrico es la máquina más utilizada para la transformación de energía eléctrica a energía mecánica puesto que tiene ventajas como: bajo costo, facilidad de transporte, limpieza y simplicidad de comando, además de tener una construcción simple y robusta a bajo costo, así como la adaptación para trabajar con diversos tipos de cargas. [18]

De acuerdo a su tipo de alimentación, los motores se clasifican en:

- a) **Motores de corriente directa:** este tipo de motores tienen un costo más elevado puesto que necesita de una fuente de corriente directa o de un dispositivo para convertir la corriente alterna a corriente directa.
- b) **Motores de corriente alterna:** son el tipo de motores más utilizados porque la distribución de energía eléctrica es a través de corriente alterna.

### 2.1.1.1.1 Principio básico de funcionamiento del motor eléctrico.

El principio de funcionamiento de un motor es que a través de un conductor colocado en un campo magnético experimenta una fuerza al circular una corriente por el mismo como se muestra en Fig. 4.

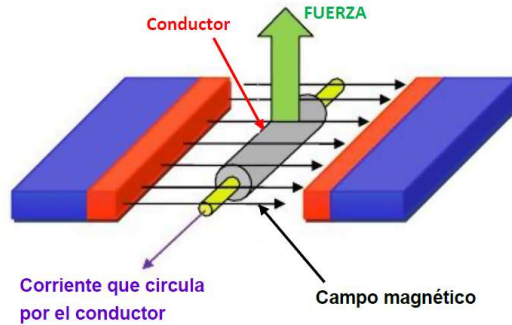


Fig. 4 Principio de funcionamiento de un motor. Fuente: [https://www.academia.edu/38587327/Maquinas\\_electricas\\_apuntes](https://www.academia.edu/38587327/Maquinas_electricas_apuntes).

La magnitud de la fuerza varía de acuerdo con la intensidad del campo magnético y la magnitud de la corriente que circula por el conductor, de acuerdo con la expresión:

$$F = IL \times \vec{B} \quad (1)$$

Donde:

$F$ = Fuerza magnética.

$I$ = Corriente eléctrica.

$L$ = Longitud.

$\vec{B}$  Campo magnético.

### 2.1.1.1.2 Motores de corriente directa.

Un motor de corriente directa (CD) está compuesto por un rotor y un inductor principalmente, estos a su vez se componen de las partes que se muestran en Fig. 5 y son descritas a continuación [18]:



Fig. 5. Partes de un motor de corriente continua. Fuente: <https://i1.wp.com/www.ingmecafenix.com/wp-content/uploads/2017/04/motor-partes.jpg?ssl=1>

- a) Un imán fijo que constituye el inductor
- b) Un bobinado denominado inducido que es capaz de girar en el interior del primero, cuando recibe una CD.
- c) Las escobillas tienen la función de transmitir la corriente proveniente de la fuente CD al colector o conmutador. Las escobillas son de grafito, material menos duro que el del conmutador, con el fin de evitar el desgaste del mismo. Debido a que el acercamiento de las escobillas al conmutador debe ser continuo para evitar las chispas entre una conmutación y otra, las escobillas poseen un sistema de resortes que proveen la presión suficiente para generar un contacto adecuado entre estas y el conmutador.
- d) El colector o conmutador es un conjunto de láminas que van montadas sobre el rotor, separadas entre sí y del eje por medio de materiales aislantes para evitar el contacto eléctrico con estos. Su función es la de mantener la corriente que viene de las escobillas en un flujo unidireccional y comunicándola de esta manera al inducido.
- e) Eje que tiene como responsabilidad ser la parte móvil del rotor y sobre el que van montados: el inducido, el colector o conmutador y el núcleo del inducido. Para facilitar su movimiento giratorio está soportado sobre cojinetes.

### 2.1.1.1.3 Motores de corriente alterna.

Los motores de CA utilizan la tensión de las líneas de alimentación domiciliaria e industrial para su funcionamiento. En la Fig. 6 se muestra un motor de CA.

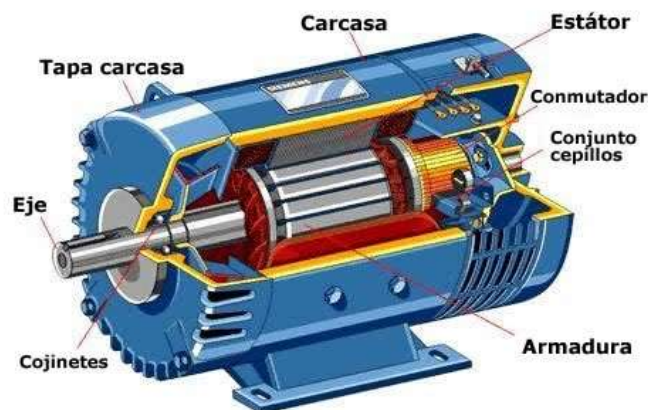


Fig. 6. Motor de Corriente Alterna. Fuente: <https://www.kellyangood.co.uk/motors/aplicaciones-de-los-motores-de-corriente-alterna/>.

El motor de CA más utilizado en la industria es el de tres fases de inducción, el cual servirá como base para describir las partes de los motores de CA. Las partes principales de este tipo de motores son: rotor, estator y carcasa, las cuales son descritas a continuación: [18]

- a) El estator es la parte estacionaria del circuito electromagnético del motor. El núcleo del estator se compone de muchas hojas de metal delgado, llamadas

láminas, que se utilizan para reducir las pérdidas de energía que se obtendrían si se utiliza un núcleo sólido.

- b) El rotor es la parte giratoria del circuito electromagnético del motor. El tipo más común de rotor utilizado en un motor de inducción de tres fases es un rotor de jaula de Ardilla. El rotor de jaula de ardilla se llama así porque su construcción es una reminiscencia de las ruedas de ejercicio de rotación se encuentran en las jaulas de los Hámster. El núcleo de un rotor de jaula de ardilla se hace por apilamiento de finas láminas de acero, como se muestra en Fig. 7, para formar un cilindro.



Fig. 7. Rotor de un motor de corriente alterna. Fuente: [https://www.academia.edu/38587327/Maquinas\\_electricas\\_apuntes](https://www.academia.edu/38587327/Maquinas_electricas_apuntes)

- c) La carcasa consta de un marco (o palanca) y dos grupos de cajas de cojinetes. El estator está montado en el interior del marco. El rotor se ajusta en el interior del estator con una ligera capa de aire (entrehierro) que lo separa del estator. No hay conexión física directa entre el rotor y el estator por lo tanto no existe un rozamiento entre las dos partes.
- d) La carcasa protege las partes internas del motor del agua y otros elementos del medio ambiente. El grado de protección depende del tipo de carcasa.

### 2.1.1.2 Transformadores.

El transformador es una máquina estática que es capaz de transformar un nivel de tensión y corriente CA a niveles distintos de CA. Este dispositivo es fundamental en la distribución de energía eléctrica puesto que es importante elevar el voltaje para transportar la energía eléctrica a grandes distancias con pocas pérdidas.

#### 2.1.1.2.1 Principio de funcionamiento de un transformador.

Para explicar el funcionamiento de un transformador se define el transformador monofásico que consiste de dos o más enrollados o bobinas enlazados por un flujo magnético a través de un núcleo formado de material ferromagnético para generar tensiones inducidas a partir de la variación de flujos magnéticos que enlazan sus enrollados. [19]

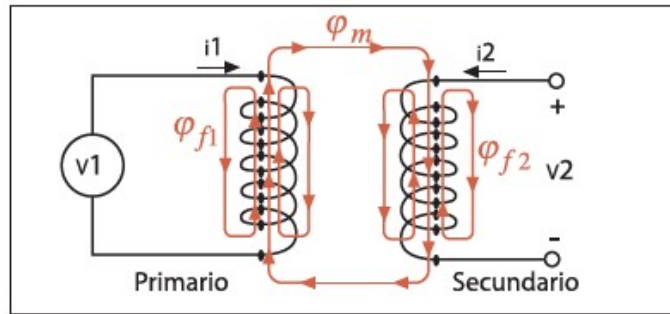


Fig. 8. Diagrama de un transformador. Fuente: F. Barria, (2012).

Uno de estos enrollados (primario) se conecta a una fuente de alimentación alterna  $v_1$  como se muestra en la Fig. 8, circulando por él una corriente alterna  $i_1$  que genera un flujo magnético  $\phi_1$  cuya magnitud dependerá del voltaje aplicado y del número de espiras del primario (vueltas del conductor). Una parte de este flujo  $\phi_{m1}$  enlaza al otro enrollado (secundario), induciendo en él una tensión también alterna  $v_2$  cuya magnitud dependerá del número de espiras del mismo. Al inducirse esta tensión alterna, el enrollado secundario también genera un flujo magnético  $\phi_2$ , siendo una parte del mismo enlazada por el primario  $\phi_{m2}$  por lo que el resultado global del proceso es un flujo magnético alterno común que enlaza a ambos enrollados:

$$\phi_m = \phi_{m1} + \phi_{m2} \quad (2)$$

Donde:

$\phi_m$  = Flujo magnético común.

$\phi_{m1}$  = Flujo magnético enlazado al enrollado secundario.

$\phi_{m2}$  = Flujo magnético enlazado al enrollado primario.

Por otro lado, una parte de los flujos alternos inducidos en las bobinas salen del núcleo ferromagnético y por tanto, no enlazan sino al mismo enrollado que las produce. Estos flujos se conocen como flujos de fuga ( $\phi_{f1}, \phi_{f2}$ ) y afectan el funcionamiento del transformador.

### 2.1.1.3 Generadores.

Los generadores son máquinas rotativas que transforman la energía mecánica en energía eléctrica, mientras que los motores transforman la energía eléctrica en energía mecánica; los generadores y motores eléctricos son muy parecidos, de hecho, están contruidos de la misma forma general, ambos dependen de los mismos principios electromagnéticos para su operación. [20]

### 2.1.1.3.1 Principio de funcionamiento de los generadores eléctricos.

El principio básico de funcionamiento de cualquier generador eléctrico es la llamada Ley de Faraday-Lenz, la cual señala que en un conductor o circuito eléctrico que enlaza un flujo magnético variable en el tiempo, se induce una FEM o tensión inducida  $\varepsilon$  dada por:

$$\varepsilon(t) = - \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (3)$$

Donde:

$\varepsilon$ = Tensión inducida.

$\varphi$ = Flujo magnético.

Esta tensión inducida hará circular entonces una corriente por el circuito. La variación de  $\varphi$  en el tiempo, puede producirse por una corriente variable en el tiempo (como ocurre en los transformadores) o por una variación en la geometría del sistema (como ocurre en los generadores donde la geometría varía de acuerdo al movimiento proporcionado mecánicamente).

### 2.1.1.3.2 Generadores asíncronos o de inducción.

Un generador asíncrono está formado por un estator en el que se aloja un devanado trifásico a lo largo de su periferia, con una configuración tal que los conductores que ocupan posiciones homologas en cada una de las fases están desfasados  $120^\circ$  eléctricos. Así como un rotor que a su vez posee dos tipos de ejecuciones posibles: de jaula de ardilla o un sistema de bobinado, ambos se pueden observar en la Fig. 9. [21]

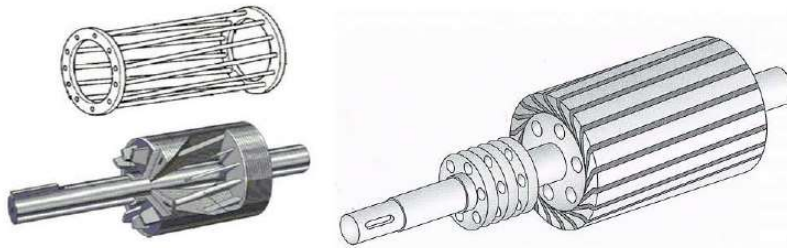


Fig. 9. Tipos de rotor para máquina asíncrona.

Izquierda: rotor jaula de ardilla. Derecha: rotor bobinado. Fuente: J. González, (s.f.).

#### 2.1.1.3.2.1 Rotor tipo jaula de ardilla.

Consiste en una serie de barras axiales de aluminio o cobre (instaladas en las ranuras del rotor) cortocircuitadas en sus extremos por dos anillos conductores. La gran simplicidad en el diseño de este rotor es la que le otorga a la máquina de inducción las ventajas de diseño compacto, costo y mantención. [19]



#### **2.1.1.3.2.2 Rotor tipo bobinado.**

Es más complejo que el anterior. Los enrollados son similares a los del estator y conservan el mismo número de polos. Los terminales libres de las bobinas están conectados a anillos rozantes montados sobre el eje de la máquina. La placa de terminales se conecta con los anillos mediante escobillas o carbones. En general se pierden los atributos de simplicidad y mantención respecto de la máquina con rotor jaula de ardilla.

#### **2.1.1.3.3 Generadores síncronos.**

Los generadores síncronos constituyen el elemento esencial de las centrales eléctricas convencionales. En ellos, se produce el proceso de conversión de la energía mecánica suministrada por un eje en energía eléctrica que se cede a través de los bornes a la carga. [19]

De modo que, los generadores síncronos deben ser accionados por un elemento motor primario. En el caso de la energía undimotriz, este elemento motriz puede adoptar diferentes formas, pueden ser una turbina hidráulica, en el caso de una columna de agua oscilante, o una turbina neumática aprovechando un flujo de aire, o mediante accionamiento directo del oleaje.

De forma general, un generador síncrono se compone principalmente de un estator ranurado, en el que se aloja un devanado trifásico, y un rotor, en el que se aloja un sistema de excitación. Este sistema de excitación es quien actuará como el inductor de la máquina, generando un campo magnético giratorio de amplitud constante. Al hacer girar el rotor a velocidad constante, se induce una FEM en los devanados del estator.

#### **2.1.1.3.4 Generador de imanes permanentes.**

Esta rama de los generadores síncronos como se menciona en [19] se trata de un sistema muy útil para aquellas aplicaciones en las que se les exija un funcionamiento partiendo de tensión cero, y que por tanto no pierdan su excitación en ningún momento. En este caso el sistema de excitación se realiza gracias a la propia característica de magnetización de los imanes que generan la fuerza magnetomotriz (FMM), que es básica para el funcionamiento de la máquina.

Debido a la imposibilidad de regular la FMM, si se desea controlar la corriente inducida es necesario conectar el generador a la red mediante un convertidor de frecuencia. Este dispositivo estará formado por un rectificador, que convierte la corriente alterna en continua, y un inversor conectado en serie, que la convierte nuevamente en alterna a la misma frecuencia a la que se encuentre la red.

A diferencia del generador síncrono convencional, este tipo de generador de imanes permanentes es libre de bobinas de excitación y del sistema escobillas-anillos rozantes.

#### 2.1.1.3.4.1 Construcción.

El generador consta de dos partes fundamentales como se muestra en la Fig. 10, el inductor, que es el que crea el campo magnético y el inducido que es el conductor que es atravesado por las líneas de fuerza de dicho campo.

Al primer principio se le llama acción del generador y se le conoce también como de inducción. El voltaje se puede inducir en un conductor que se encuentra dentro de un campo magnético, esto sucede cuando el flujo magnético se corta por el conductor. En algunos casos, se mueve el alambre; en otros se mueve el campo, y aún en otros, ambos se mueven, pero a distintas velocidades.

El segundo principio, es el llamado la acción del motor, éste es simplemente las fuerzas mecánicas entre imanes. Cuando dos imanes (o electroimanes) se aproximan uno a otro, uno es atraído o repelido con respecto al otro, algunos motores usan un imán permanente y un electroimán, otros, usan dos electroimanes; de cualquier manera, la energía eléctrica crea al menos uno de los campos magnéticos, entonces, las fuerzas entre los dos campos magnéticos producen el movimiento.

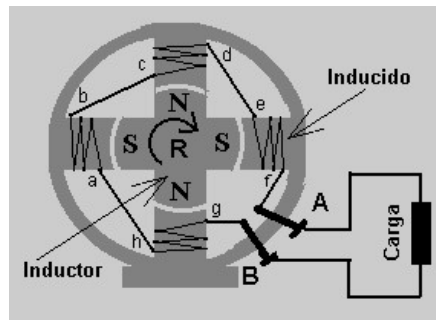


Fig. 10. Elementos de un generador simple. Fuente: [https://docs.google.com/document/d/1nV0fK9O3RqwWZ6NtF-Wwj0E2hYb\\_PrYwzinXUwu8BiM/edit](https://docs.google.com/document/d/1nV0fK9O3RqwWZ6NtF-Wwj0E2hYb_PrYwzinXUwu8BiM/edit)

#### 2.1.1.3.4.2 Principio de funcionamiento.

En la Fig. 11 se muestra un generador sincrónico monofásico. El rotor del generador consiste en un imán permanente que genera un campo magnético  $\vec{B}$  constante y se encuentra rotando (gracias a una máquina impulsora externa) a una velocidad angular  $\omega$ . [19]

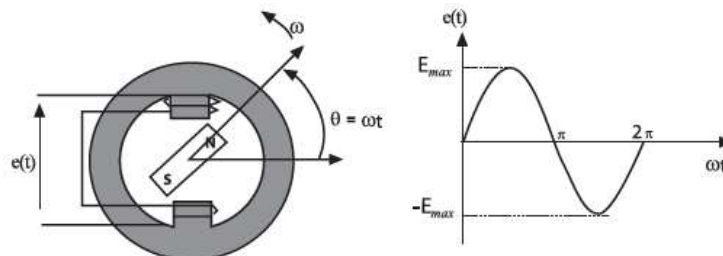


Fig. 11. Generador sincrónico monofásico. Fuente: F. Barria, (2012).

El giro del eje del rotor hace que el flujo enlazado por la bobina del estator sea variable de modo que se induce una tensión debido a esta variación (Ley de Faraday-Lenz). La tensión generada en los terminales del estator es:

$$\varepsilon(t) = k \cdot \vec{B} \cdot \text{sen}(\omega t) = E_{m\acute{a}x} \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (4)$$

Donde:

$\varepsilon$ = Tensión inducida.

$k$ = Constante de diseño de la máquina.

$\vec{B}$ = Densidad de flujo magnético generada por el rotor.

$\omega$ = Velocidad angular mecánica del rotor.

$E_{m\acute{a}x}$ = Voltaje máximo

De acuerdo con la ecuación anterior, la máquina corresponde a un generador de voltaje alterno sinusoidal, cuya frecuencia eléctrica  $\omega_e = \omega$  es igual a la velocidad mecánica de giro del rotor  $\omega_m = \omega$ . Por esta razón se denomina generador síncrono, y corresponde a la velocidad de sincronismo. Se observa, además, que la magnitud de la tensión generada es proporcional a la densidad de flujo magnético. De este modo, si en lugar de un imán permanente se coloca un enrollado de excitación en el rotor, es posible controlar el valor máximo del voltaje inducido a través de la alimentación del mismo en corriente continua.

El caso anterior corresponde a un generador con dos polos. En el caso de un generador con un mayor número de polos, la frecuencia eléctrica generada será equivalente a:

$$f = \frac{n_s \cdot p}{120} \quad (5)$$

Donde:

$f$ = Frecuencia eléctrica de la tensión generada en Hz.

$n_s$ = Velocidad de giro del eje en revoluciones por minuto [R.P.M.] (velocidad de sincronismo).

$p$ = Número de polos del generador.

#### **2.1.1.3.4.3 Tipos de generadores de imanes permanentes.**

Para generar electricidad se debe empezar con un campo magnético principal, entonces, este campo se debe cortar por un conductor, el campo principal se puede producir por un imán permanente que puede ser parte del estator, como se muestra en la Fig. 12. O bien, puede ser parte del rotor como se muestra en la Fig. 13. El campo principal puede ser un campo electromagnético en lugar de un imán

permanente, la bobina que lo produce se le llama el devanado de campo, o simplemente el campo. [20]

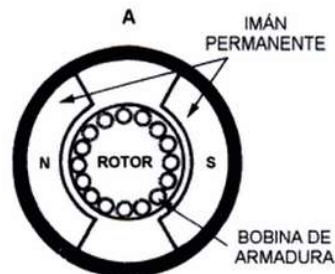


Fig. 12. *Imán permanente que forma parte del estator. Fuente: G. Enríquez, (2004).*

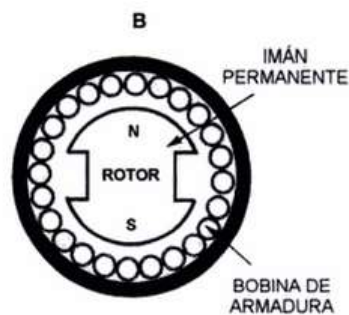


Fig. 13. *Imán permanente que forma parte del rotor. Fuente: G. Enríquez, (2004).*

El campo se puede devanar sobre el estator, como se muestra en la Fig. 14, o sobre el rotor como se muestra en la Fig. 15. Los conductores en los que se induce la electricidad, forman el devanado de armadura. En todos los generados de corriente directa, el devanado de armadura está sobre el rotor o parte giratoria; sin embargo, en los generadores de corriente alterna para ciertas aplicaciones, el devanado de armadura está en la parte estacionaria(estator).

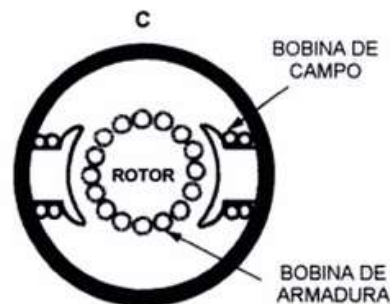


Fig. 14. *Campo devanado sobre el estator. Fuente: G. Enríquez, (2004).*

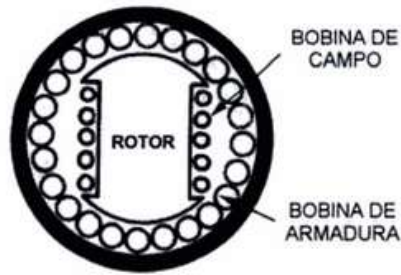


Fig. 15. Campo devanado sobre el rotor. Fuente: G. Enríquez, (2004).

Navasquillo en [14] menciona que según sea el eje de giro, los generadores son de dos tipos, de flujo axial y de flujo radial.

- a) Generadores de flujo axial: el eje de giro es paralelo al campo magnético de los imanes.
- b) Generadores de flujo radial: el eje de giro es perpendicular al campo magnético de los imanes.

En los generadores de flujo axial, los imanes se disponen sobre un disco de hierro que gira alrededor de un eje perpendicular que pasa por su centro. Así pues, el campo magnético de los imanes es paralelo al eje de giro, y de ahí la frase “flujo axial” que realmente significa campo magnético paralelo al eje de giro.

En los generadores de flujo radial, los imanes se colocan sobre la superficie lateral de un cilindro que gira alrededor de su propio eje. En este caso el campo magnético de los imanes es perpendicular al eje de giro, y por tanto va en dirección radial, y de ahí la frase “flujo radial” que realmente significa campo magnético en dirección radial o perpendicular al eje de giro. Ambos tipos de generadores se muestran en la Fig. 16.

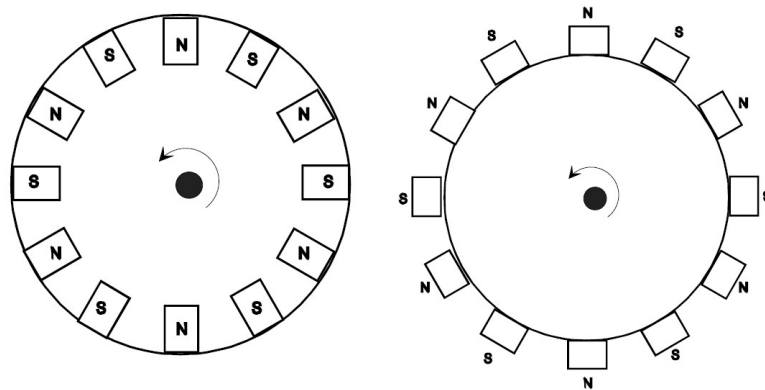


Fig. 16. Clases de generadores de imanes permanentes (flujo axial y flujo radial). Fuente: J. Navasquillo, (s.f.).

### 2.1.1.3.4.3.1 Principio de funcionamiento del generador síncrono de flujo axial.

En un generador de flujo axial, el flujo magnético pasa por las bobinas en dirección paralela al eje de la máquina. Se compone de un rotor frontal, un estator y un rotor posterior. Ambos rotores están unidos por un eje longitudinal. [22] La disposición de estas partes en el generador se puede apreciar en la Fig. 17.

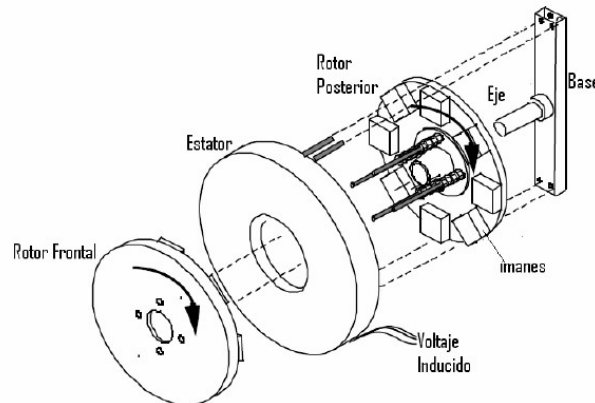


Fig. 17. Estructura de un generador de flujo axial. Fuente: P. Baillarie, (2007).

El estator contiene bobinas de alambre de cobre, en las cuales se induce el voltaje producto del flujo variable que produce el campo magnético de los imanes permanentes ubicados en los rotores frontal y posterior. El estator está montado en una base fija, inmóvil.

Los imanes permanentes se ubican de forma tal que el flujo magnético pasa de un rotor a otro, cruzando a través de las bobinas del estator, mientras el eje del rotor gira; se induce así el voltaje sinusoidal en los terminales de las bobinas. [23]

## 2.3 Transformación de energía.

Los circuitos electrónicos de potencia convierten la energía eléctrica de un tipo en otro utilizando dispositivos electrónicos. Dichos circuitos funcionan utilizando dispositivos semiconductores como interruptores, para controlar o modificar una tensión o una corriente. [23]

En la Fig. 18 se muestra el diagrama de la clasificación de los convertidores de energía en función del tipo de energía eléctrica que los alimenta como en [24].

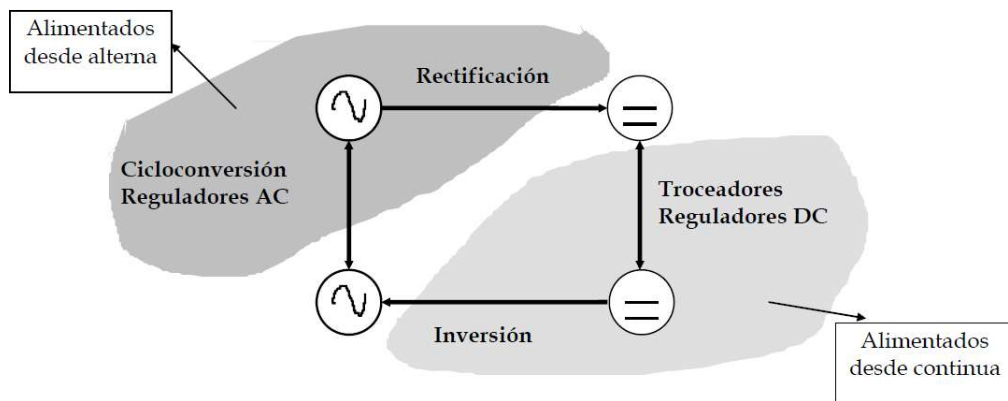


Fig. 18. Transformación de la energía. Fuente: J. Aguilar, (2015).

Los circuitos electrónicos de potencia convierten una forma de onda de corriente o de tensión de un cierto tipo o nivel en otro; por esto se denominan convertidores. Los convertidores se clasifican según la relación existente entre la entrada y la salida como se menciona en [23]:

- **Entrada CA/Salida CD**

Los convertidores CA-CD o rectificadores producen una salida continua a partir de una entrada alterna. La potencia media se transfiere desde un generador de alterna a una carga de corriente continua. A los convertidores CA-CD se les denomina, específicamente, como rectificadores. Por ejemplo, un convertidor CA-CD permite que los circuitos integrados operen a partir de una tensión alterna de línea a 60 Hz, convirtiendo la señal alterna en una señal continua de la tensión apropiada.

- **Entrada CD/Salida CA**

El convertidor CD-CA se denomina, específicamente, como inversor. En el inversor, la potencia media fluye desde el lado de corriente continua hacia el lado de corriente alterna. Entre los ejemplos de aplicaciones de los inversores se incluyen la generación de una tensión de 120 V eficaces (rms) a 60 Hz a partir de una batería de 12 V y la conexión de una matriz de células solares con un aparato eléctrico.

- **Entrada CD/Salida CD**

El convertidor CD-CD o troceador resulta útil cuando una carga requiere una corriente o una tensión continua específica (normalmente regulada), pero el generador tiene un valor de continua diferente o no regulado. Por ejemplo, a partir de un generador de 12 V y a través de un convertidor CD-CD pueden obtenerse 5 V.

- **Entrada CA/Salida CA**

El convertidor CA-CA se denomina cicloconvertidor y puede utilizarse para cambiar la amplitud y/o la frecuencia de una señal alterna. Un ejemplo, entre otros, sería un simple atenuador para la iluminación doméstica y un control de velocidad para un motor de inducción.

Las aplicaciones de los circuitos electrónicos de potencia abarcan desde los equipos de conversión de alta potencia, como los sistemas de transmisión de corriente directa (CD), hasta aparatos de uso común.

Las aplicaciones típicas de la electrónica de potencia son, entre otras, la conversión de corriente alterna (CA) en corriente directa (CD), la conversión de corriente continua en alterna (CD en CA), la conversión de una tensión continua no regulada en una tensión continua regulada y la conversión de una alimentación alterna de determinada amplitud y frecuencia en otra amplitud y frecuencia distintas, gracias a la activación y desactivación de los interruptores de la electrónica de potencia, en los cuales se almacena la energía proveniente de una fuente de alimentación en los elementos pasivos en un estado encendido, para su posterior procesamiento en otro tiempo de switcheo.

### **2.3.1 Interruptores electrónicos.**

Un interruptor electrónico se caracteriza por tener dos estados, activado (ON) representado como un cortocircuito y desactivado (OFF), que se representa idealmente un circuito abierto. Las aplicaciones que utilizan este tipo de conmutación presentan bajas pérdidas de conmutación en el dispositivo (menores a 15%). [25]

El comportamiento de los circuitos electrónicos de potencia no se ve afectado de forma particular por el dispositivo real que se utilice para la conmutación, especialmente si las caídas de tensión en los pines del interruptor en estado de conducción son pequeñas comparadas con otras tensiones del circuito. Por tanto, los dispositivos semiconductores se modelan normalmente como interruptores ideales, con el fin de poder centrarse en el comportamiento del circuito. Los interruptores se modelan como cortocircuitos cuando están activados y como circuitos abiertos cuando no lo están. Se supone que las transiciones entre estos dos estados son instantáneas. Estos interruptores están compuestos por materiales semiconductores.

#### **2.3.1.1 Semiconductores.**

Los semiconductores se encuentran situados, entre los conductores y los aislantes, como menciona en [26], ya que a temperaturas muy bajas es difícil que puedan conducir la corriente eléctrica y se comportan como aislantes, pero al elevar su temperatura o al ser sometidos a un campo eléctrico externo, su comportamiento cambia al de un conductor. Estos semiconductores son conocidos como intrínsecos, en ellos las bandas de conducción y valencia se encuentran separadas por una



barrera de energía (banda prohibida) más pequeña (comparada con la del diamante), de aproximadamente 1 eV (electronvoltio), 1.1 eV para el Si y 0.7 eV para el Ge.

En este tipo de materiales, cuando se transfiere un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción, se crea un “hueco” que actúa como un “transportador” de carga positiva, fenómeno que eventualmente puede crear una “corriente positiva”.

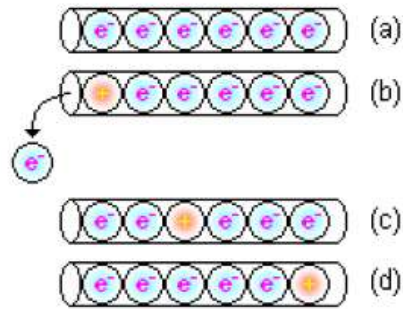


Fig. 19. Movimiento de huecos en un semiconductor. Fuente: L. Farrera, (2008).

Para entender el movimiento relativo de los huecos, podemos imaginar a los electrones como esferas que se mueven por un tubo (Fig. 19.a). Cuando una esfera (electrón) se disloca, deja un espacio vacío (hueco positivo), el cual es ocupado inmediatamente por la esfera (electrón) adyacente, (Fig. 19.b) y (Fig. 19.c). El desplazamiento se repite hasta que la última esfera (electrón) se mueve, dejando un último espacio vacío (hueco), (Fig. 19.d). El movimiento de las esferas hacia la izquierda, genera un movimiento aparente de los espacios vacíos hacia la derecha. De la misma manera, puede entenderse el movimiento, en sentidos opuestos, de los electrones (negativos) y “huecos” positivos, en un semiconductor. En los semiconductores intrínsecos, el número de electrones disponibles para la conducción y los correspondientes huecos formados, se encuentran en igual número y los materiales de este tipo son de poca utilidad para la electrónica. Sin embargo, cuando se agregan ciertos átomos (impurezas) a estos materiales, sus propiedades eléctricas cambian notablemente. Así, cuando se agrega una impureza “donadora de electrones”, la proporción de electrones será mayor que la de huecos, y el material se comportará como un “portador de carga negativa” (electrónica), aunque los huecos estarán presentes en menor proporción. De la misma forma, cuando se agrega una impureza “aceptora de electrones”, el material semiconductor se convertirá en un semiconductor “portador de carga positiva” (huecos), con electrones presentes en menor proporción. Al proceso de controlar la calidad y la cantidad de las impurezas, de una clase o de otra, se denomina “dopaje”. A los materiales semiconductores con impurezas de un tipo u otro, se conocen como semiconductores extrínsecos.

### 2.3.1.2 Flujo de corriente en materiales tipo n y p.

En un material semiconductor, existe el mismo número de portadores de carga de ambos tipos (huecos y electrones), por lo que el material es en esencia neutro. Sin embargo, cuando un semiconductor intrínseco es dopado, aunque siempre exista la presencia de ambos tipos de conducción, el tipo de impureza determinará la predominancia de una clase de conducción u otra. Si el material es dopado con la impureza donadora de electrones, la conducción será predominantemente electrónica (material tipo  $n$ ), pero si el material ha sido dopado con una impureza aceptora de electrones, la conducción será predominantemente por huecos (material tipo  $p$ ).

Similarmente al caso de un metal, la aplicación de voltaje en un material tipo  $n$ , causará que un electrón débilmente ligado al átomo de impureza, se mueva hacia un punto de potencial positivo como se muestra en la Fig. 20. Pero en forma inversa a lo que sucede en el metal, un incremento en la temperatura permite que más electrones se encuentren disponibles para la conducción (disminución de la resistencia del material). En un material tipo  $p$ , por otro lado, la conducción se da por transportadores de carga positiva (*huecos*), que se "mueven" hacia la terminal negativa del circuito (flujo de corriente por huecos).

En la terminal negativa los huecos que "llegan" son neutralizados por los electrones emitidos por la terminal, mientras que en la terminal positiva los electrones, provenientes de los enlaces covalentes debilitados, son removidos para dar lugar a la formación de nuevos huecos. Los nuevos huecos se "mueven" otra vez hacia la terminal negativa (mientras los electrones se dirigen hacia la terminal positiva) y son anulados por los electrones emitidos en esa terminal, mostrado en la Fig. 21.

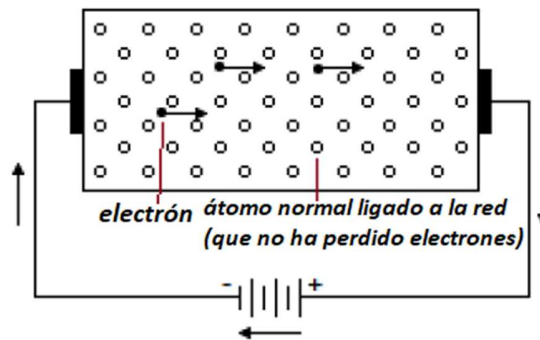


Fig. 20. Flujo de corriente en un material tipo n. Fuente: L. Farrera, (2008).

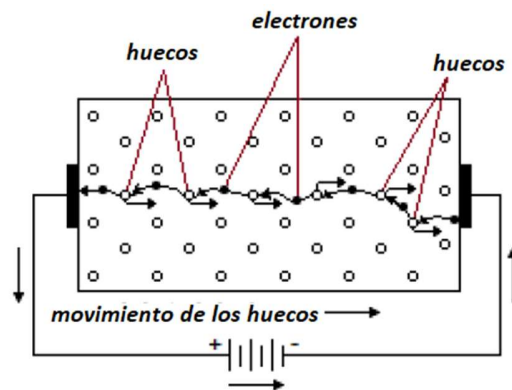


Fig. 21. Flujo de corriente en un material tipo p. Fuente: L. Farrera, (2008)

### 2.3.1.3 Uniones básicas pn.

Los semiconductores dopados  $n$  y  $p$ , son eléctricamente neutros, por ello no son útiles como tales para su uso en elementos electrónicos. Sin embargo, cuando un cristal homogéneo de material semiconductor de Ge o Si, por ejemplo, es tratado con impurezas pentavalente y trivalente, de tal forma que la mitad del cristal homogéneo es dopada con impureza trivalente mientras que la otra mitad es dopada con impureza pentavalente, aparece una fuerza a través de la unión (de naturaleza electroquímica), que se manifiesta como una atracción de los electrones del material  $n$ , por el material  $p$ . En la Fig. 21 se muestra la unión pn.

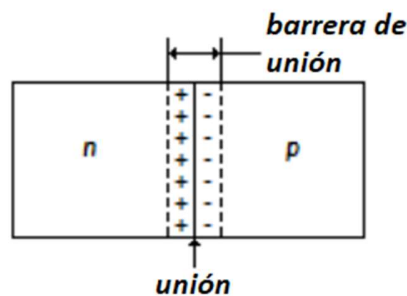


Fig. 22. Unión pn. Fuente: L. Farrera, (2008).

Esto último es provocado por el exceso de electrones en el material  $n$  y la deficiencia de ellos en el material  $p$ , que causa que los electrones del material  $n$  abandonen la estructura de dicho material y entren a la estructura del material  $p$ . Como consecuencia, la zona (muy fina) adyacente a la unión, del lado de la estructura  $p$  del cristal es cargada negativamente, mientras que la zona similar, pero ahora del lado de la estructura del material  $n$ , es cargada positivamente como se muestra en la Fig. 22. La estructura de carga formada en la unión, constituye una *barrera de potencial* o de *unión* que impide el flujo de corriente eléctrica a través de ella. Cabe aclarar que este fenómeno solo se da si se parte de un cristal homogéneo de

material semiconductor y, la unión de dos piezas separadas de materiales n y p no producen el efecto esperado.

Una unión de este tipo constituye lo que se denomina un diodo semiconductor cuyo símbolo se muestra en la Fig. 23 así como los sentidos de paso y bloqueo de corriente, y es un elemento muy útil en sistemas de rectificación de corriente alterna.

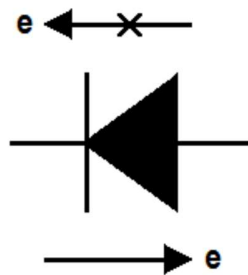


Fig. 23. Símbolo de un diodo semiconductor. Fuente: L. Farrera, (2008).

#### 2.3.1.4 Polarización de uniones pn.

Las uniones *pn* se pueden polarizar en forma directa o inversa, dependiendo de la forma en que sea aplicado el voltaje y alimentada la corriente electrónica. Si los electrones se alimentan en el extremo de la zona semiconductor tipo n, el voltaje aplicado vence la barrera de oposición en la unión (zona de transición) y produce una polarización directa que permite el paso de una corriente apreciable mostrado en la Fig. 24.

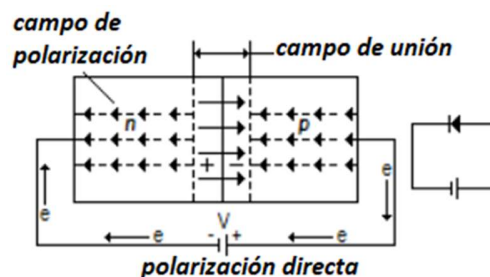


Fig. 24. Polarización directa de un diodo. Fuente: L. Farrera, (2008).

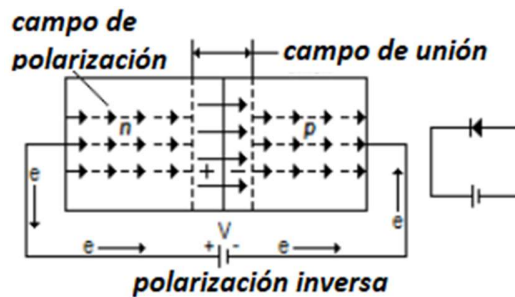


Fig. 25. Polarización inversa de un diodo. Fuente: Farrera, L. (2008).

Por el contrario, si los electrones se alimentan en la zona semiconductor tipo  $p$ , el paso de corriente es bloqueado debido a que, el voltaje aplicado (con *polarización inversa*), no es capaz de vencer la barrera de oposición en la unión (Fig. 25). En consecuencia, los diodos semiconductores son muy útiles para la construcción de puentes de rectificación (de media onda u onda completa), para transformar la corriente alterna en directa y para la estabilización de voltaje en los circuitos eléctricos y electrónicos (diodos Zener). En la Fig. 26 se muestra la curva característica de un diodo semiconductor en su polarización inversa y directa.

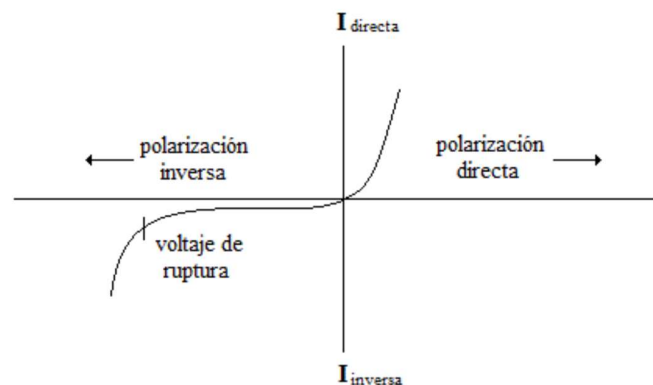


Fig. 26. Curva característica de un diodo semiconductor. Fuente: L. Farrera, (2008).

### 2.3.1.5 El diodo.

El diodo es el interruptor electrónico más simple, en el sentido de que son las tensiones y corrientes del circuito los que determinan los estados de conducción (activado) y de corte (desactivado) del diodo. El diodo está polarizado en directa (conducción) cuando la corriente  $i_d$  (Fig. 27.a) es positiva y está polarizado en inversa (en corte) cuando la tensión  $V_d$  es negativa. [24]

En el caso ideal, el diodo se comporta como un cortocircuito cuando está polarizado en directa y se comporta como un circuito abierto cuando está polarizado en inversa. Las curvas características corriente-tensión real e ideal se muestran en las Fig. 27.b y 27.c.

Una característica dinámica importante de un diodo no ideal es la corriente de recuperación inversa. Cuando un diodo pasa de conducción a corte, la corriente en el disminuye y, momentáneamente, se hace negativa antes de alcanzar el valor cero, como se muestra en la Fig. 27.d.

El tiempo  $t_{rr}$  es el tiempo de recuperación inversa, normalmente inferior a  $1\mu s$ . Este fenómeno puede resultar importante en aplicaciones de alta frecuencia. Los diodos de recuperación rápida se diseñan de modo que tengan  $t_{rr}$  menores que los diodos baja frecuencia.

Los diodos Schottky (Fig. 27.e) poseen un contacto de metal-silicio, en lugar de una unión  $p-n$ , y tienen una caída de tensión directa típica de 0.3 V. Estos diodos suelen utilizarse en aplicaciones de baja tensión y alta frecuencia donde las caídas de los diodos son importantes comparadas con las demás tensiones del circuito.

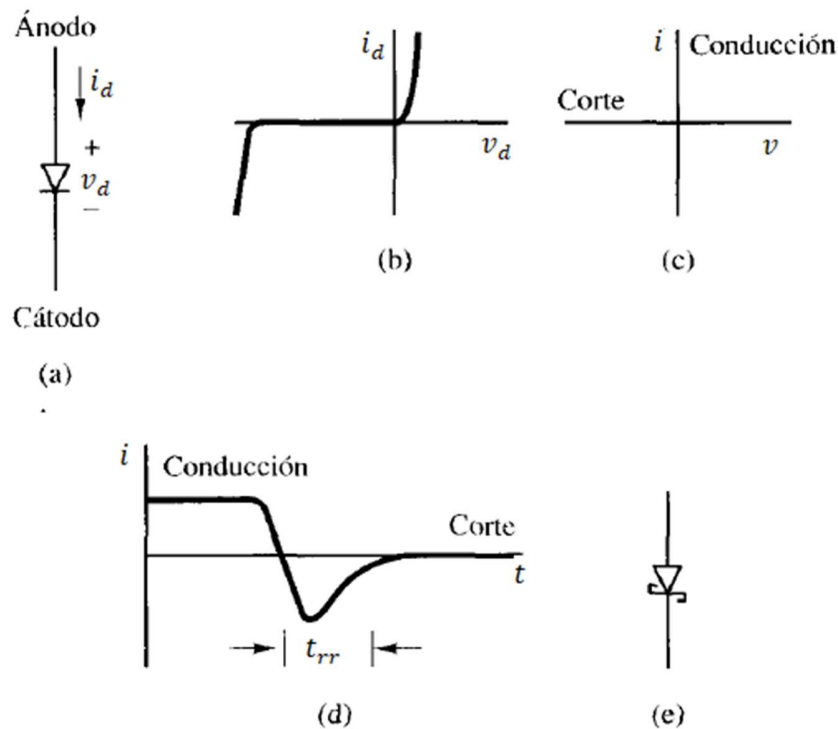


Fig. 27. (a) Diodo rectificador. (b) Característica I-V. (c) Característica I-V ideal. (d) Tiempo de recuperación inversa  $t_{rr}$ . (e) Diodo Schottky. Fuente: L. Farrera, (2008).

### 2.3.2 Rectificadores.

Una de las aplicaciones con diodos son los rectificadores los cuales es uno de los circuitos básicos de los sistemas electrónicos de potencia cuya función es convertir una tensión alterna en una tensión continua.

### 2.3.2.1 Clasificación de los rectificadores.

Los rectificadores pueden clasificarse en dos tipos:

- No controlados: emplean diodos y la tensión de salida no puede ser variada.
- Controlados: emplean tiristores y diodos, o sólo tiristores. En ellos la tensión de salida puede controlarse por medio del ángulo de disparo de los tiristores.

#### 2.3.2.1.1 Rectificadores de media onda.

El rectificador de media onda se utiliza principalmente en aplicaciones de baja potencia, ya que la corriente media de la red de suministro no será cero y una corriente media distinta de cero puede causar problemas en el funcionamiento de los transformadores. [27]

##### 2.3.2.1.1.1 Carga resistiva.

En la Fig. 28 se muestra un rectificador de media onda con una carga resistiva. Para nuestra aplicación el generador es de alterna y el objetivo es crear una tensión de carga que tenga una componente de continua no nula. El diodo es un interruptor electrónico básico que sólo permite el paso de corriente en un sentido. En el semiciclo positivo del generador de este circuito, el diodo conduce (polarizado en directa).

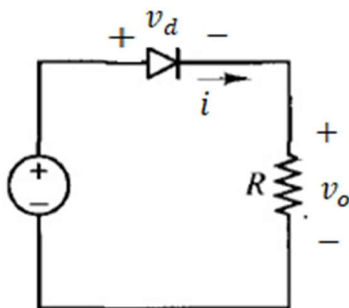


Fig. 28. Rectificador de media onda con carga resistiva. Fuente: D. Hart, (2001).

Considerando que el diodo sea ideal, la tensión en un diodo polarizado en directa es igual a cero y la corriente es positiva. En el semiciclo negativo del generador, el diodo está polarizado en inversa, lo que hace que la corriente sea cero. La tensión en el diodo polarizado en inversa es la tensión del generador, la cual tiene un valor negativo.

Las formas de onda de la tensión en el generador, la carga y el diodo se muestran en la Fig. 29.

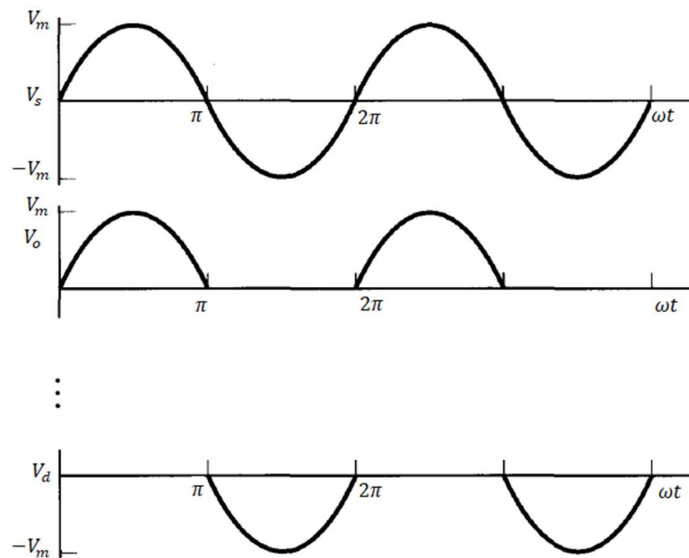


Fig. 29. Formas de onda de tensión. Fuente: Hart, D. (2001).

En el análisis, se ha supuesto que el diodo es ideal. Para un diodo real, la caída de tensión en el diodo causará que la corriente y la tensión de la carga se reduzcan, aunque no de forma apreciable si  $V_m$  es alta. Para circuitos con tensiones mucho más altas que las caídas típicas en un diodo, el modelo de diodo mejorado puede tener sólo efectos de segundo orden en la corriente y la tensión de carga.

### 2.3.2.1.2 Rectificadores de onda completa.

El propósito de un rectificador de onda completa es generar una tensión o una corriente continua. Aunque el propósito del rectificador de onda completa es básicamente el mismo que el del rectificador de media onda, los rectificadores de onda completa presentan varias ventajas fundamentales. En la Fig. 30 se muestra el rectificador en puente de onda completa.

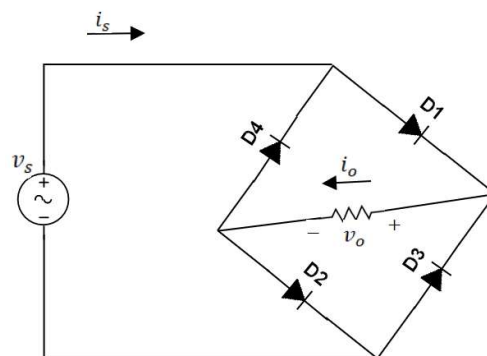


Fig. 30. Rectificador en de onda completa. Fuente: Hart, D. (2001).



La corriente media del generador de alterna es nula en el rectificador de onda completa, por lo que se evitan los problemas asociados a las corrientes medias de generador distintas de cero, especialmente para los transformadores. La salida del rectificador de onda completa presenta menos rizado que el rectificador de media onda. Las tensiones y corrientes del rectificador de onda completa se muestran en la Fig. 31.

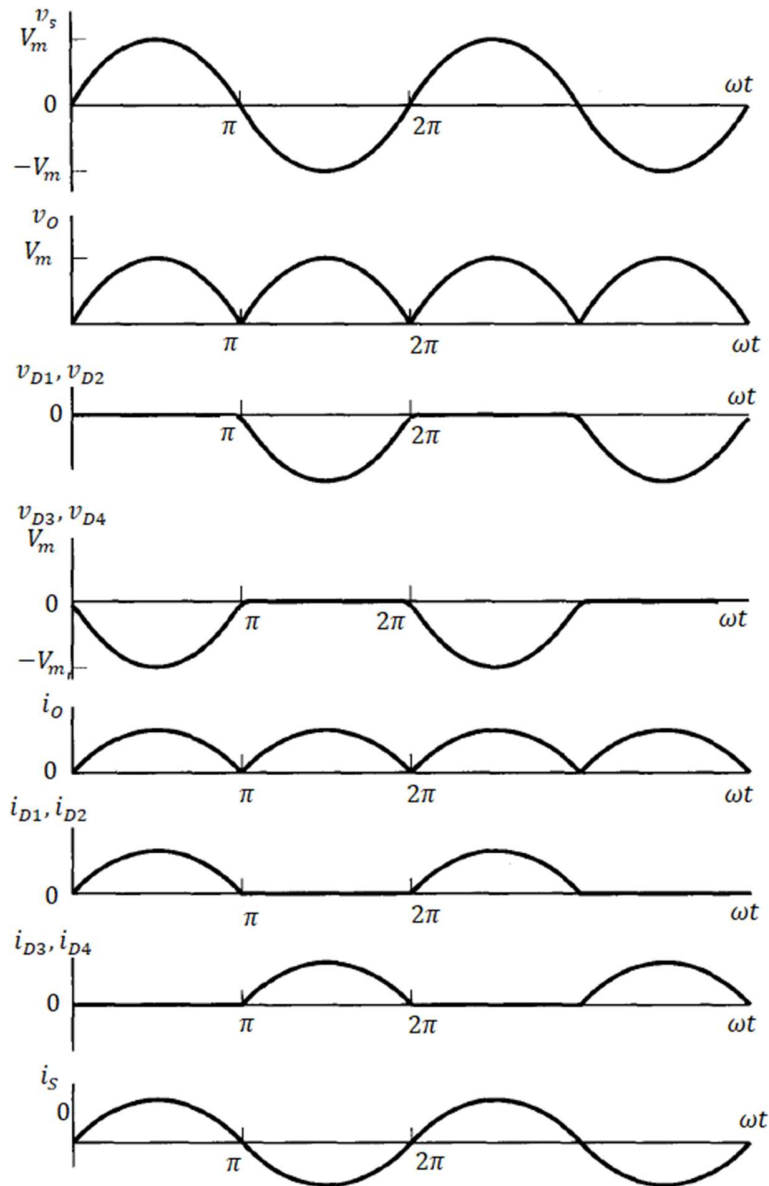


Fig. 31. Tensiones y corrientes del rectificador de onda completa. Fuente: Hart, D. (2001).

### 2.3.2.1.2.1 Rectificador en puente.

A continuación, se presentan las consideraciones básicas sobre el rectificador en puente de la Fig. 30:

1. Los diodos  $D_1$  y  $D_2$  conducen al mismo tiempo, al igual que lo hacen los diodos  $D_3$  y  $D_4$ . La ley de Kirchhoff para las tensiones aplicadas a la malla formada por el generador,  $D_1$  y  $D_3$  demuestra que  $D_1$  y  $D_3$  no pueden conducir al mismo tiempo. De la misma manera,  $D_2$  y  $D_4$  no pueden conducir simultáneamente. La corriente de carga puede ser positiva o cero, pero nunca negativa.
2. La tensión en la carga es  $+V_S$  cuando  $D_1$  y  $D_2$  conducen. La tensión en la carga es  $-V_S$  cuando  $D_3$  y  $D_4$  conducen.
3. La tensión máxima en un diodo polarizado en inversa es el valor de pico del generador, lo cual se demuestra mediante la ley de tensiones de Kirchhoff para las tensiones existentes en el bucle formado por el generador,  $D_1$  y  $D_3$ . Cuando  $D_1$  conduce, la tensión en  $D_3$  es  $-V_S$ .
4. La corriente que entra en el puente procedente del generador es  $i_{D1} - i_{D4}$ , y es simétrica respecto de cero. Por tanto, la corriente media del generador es cero.
5. La corriente eficaz del generador es la misma que la corriente eficaz de carga. La corriente del generador es la misma que la corriente de carga para la mitad del periodo del generador, y para la otra mitad es igual que la corriente de carga, pero con signo negativo. Los cuadrados de las corrientes de carga y del generador son iguales, por lo que las corrientes eficaces también lo serán.
6. La pulsación fundamental de la tensión de salida es  $2\omega$ , donde  $\omega$  es la pulsación de la entrada alterna, ya que se originan dos periodos a la salida para cada periodo de la entrada. La serie de Fourier de la salida está compuesta por un término de continua y los armónicos pares de la frecuencia del generador.

### 2.3.3 Filtros.

Un filtro idealmente elimina los rizados del voltaje de salida de un rectificador de media onda o de onda completa y produce un voltaje de cd de nivel constante.

El filtrado es necesario porque los circuitos electrónicos requieren una fuente constante de voltaje y corriente continuos para proporcionar alimentación y polarización para la operación apropiada. Los filtros se implementan con capacitores. [28]

#### 2.3.3.1 Principio de funcionamiento.

La Fig. 32 muestra una fuente alterna, un diodo y un capacitor. Inicialmente, el capacitor está descargado. Durante el primer cuarto de ciclo el diodo está polarizado en directa. Dado que idealmente funciona como un circuito cerrado, el capacitor se carga y su tensión se iguala a la tensión de fuente en cada instante del primer cuarto de ciclo. La carga continúa hasta que la entrada alcanza su máximo valor. En este punto, la tensión del capacitor es igual a  $V_p$ .

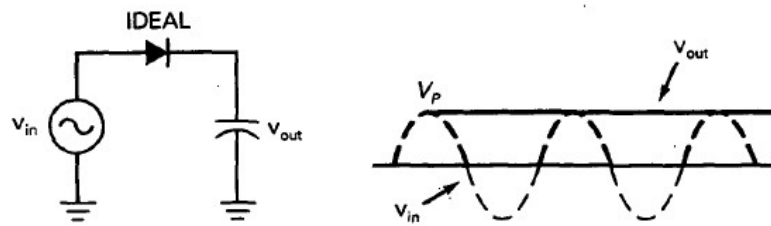


Fig. 32. Filtro con capacitor en la entrada sin carga en donde la salida es tensión continua. Fuente: T. Floyd, (2008).

Después de que la tensión de entrada alcanza el pico, empieza a decrecer. Tan pronto como la tensión de entrada sea menor que  $V_p$ , el diodo deja de conducir. En este caso, actúa como el interruptor abierto de la Fig. 33. Durante los ciclos siguientes, el capacitor permanece totalmente cargado y el diodo abierto. Esta es la razón de que la tensión a la salida en la Fig. sea constante e igual a  $V_p$ . [29]

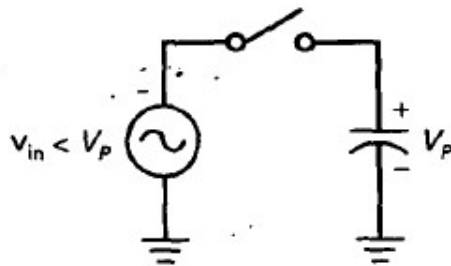


Fig. 33. Esquema que representa el diodo abierto. Fuente: A. Malvino, (2000).

Idealmente, todo lo que hace el filtro con capacitor a la entrada es cargar el capacitor a la tensión de pico durante el primer cuarto de ciclo. Esta tensión de pico es constante, la tensión continua perfecta que necesitamos para los equipos electrónicos. Solo existe un problema: no hay resistencia de carga.

### 2.3.3.2 Efecto de la resistencia de carga.

Para que el filtro con capacitor a la entrada sea útil, necesitamos conectar una resistencia de carga a través del capacitor, como se muestra en la Fig. 34. Mientras la constante de tiempo  $R_L C$  sea mucho mayor que el periodo, el capacitor permanece casi totalmente cargado y la tensión en la carga es aproximadamente  $V_p$ . La única desviación de la tensión perfecta es el pequeño rizado que se muestra en la Fig. 35. Cuanto menor sea el valor de pico a pico de este rizado, mejor se aproximará la salida a una tensión continua perfecta.

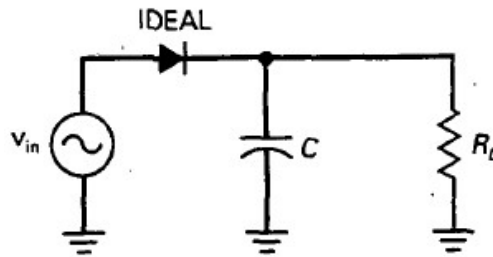


Fig. 34. Filtro con capacitor a la entrada con carga. Fuente: A. Malvino, (2000).

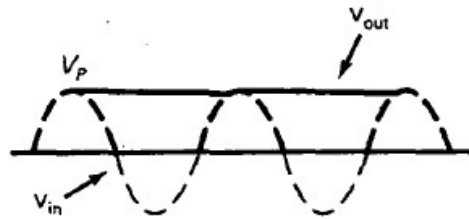


Fig. 35. La salida es la corriente directa con un pequeño rizado. Fuente: A. Malvino, (2000).

Entre picos, el diodo está apagado y el capacitor se descarga a través de la resistencia de carga; en otras palabras, el capacitor suministra corriente a la carga. Como el capacitor se descarga sólo ligeramente entre picos, el rizado de pico a pico es pequeño como se muestra en la Fig. 36. Cuando llega el siguiente pico, el diodo conduce brevemente y recarga el capacitor al valor pico.

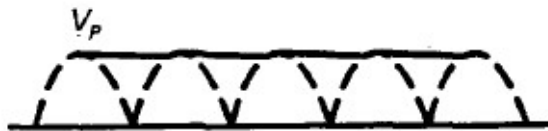


Fig. 36. La onda completa de salida tiene menos rizado. Fuente: A. Malvino, (2000).

### 2.3.3.3 Filtro de onda completa.

Si conectamos un puente rectificador a un filtro de choque, el rizado de pico a pico se corta por la mitad. La respuesta la encontramos en la Fig. 36. Cuando una tensión de onda completa se aplica a un circuito  $RC$ , el capacitor se descarga sólo la mitad del tiempo. Por lo tanto, el rizado de pico a pico tiene la mitad de tamaño que tendría con un rectificador de onda completa.

## 2.4 Troceadores.

Cuando los dispositivos rectificadores están unidos a una fuente alterna, los semiconductores tenían un proceso de conmutación a corte de forma natural. Cuando la alimentación es una fuente de CD, el principio de conmutar de forma periódica las conexiones entre la fuente CD y la carga proporciona un mecanismo

para controlar la potencia en la carga. Estos circuitos se les denomina troceadores ("choppers") o reguladores estáticos de continua.

Los reguladores estáticos de continua son sistemas que transforman la corriente continua de tensión constante en corriente continua de tensión variable y de la misma frecuencia. En el límite donde la potencia entregada a la carga sea máxima o nula se obtienen los interruptores estáticos de continua. [30]

### 2.4.1 Principio de funcionamiento.

El interruptor se abre y se cierra siguiendo una señal de periodo "T" denominada periodo de convertidor. El tiempo durante el cual el interruptor está cerrado, y por tanto la carga se encuentra conectada a la fuente primaria de energía, se denominará tiempo de conducción, " $T_{ON}$ ". Por otro lado, el tiempo que el interruptor permanece abierto, dejando aislada la carga, se llamará tiempo de bloqueo, " $T_{OFF}$ ". La suma de  $T_{ON}$  y  $T_{OFF}$ , como se puede apreciar en la Fig. 37, da el periodo de convertidor (T).

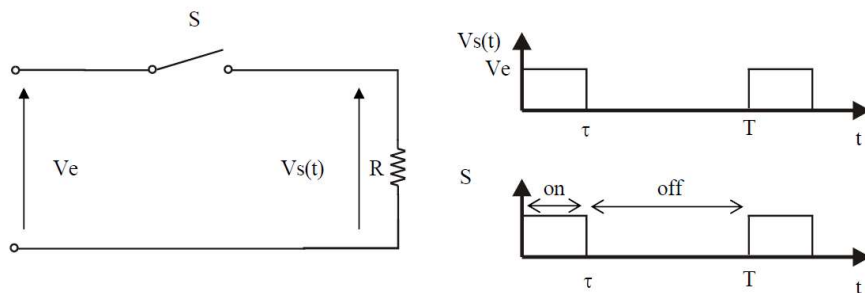


Fig. 37. Principio de funcionamiento de un interruptor. Fuente: Mañana, M. (s.f.).

Cuando el interruptor S está cerrado,  $0 < t < T_{ON}$ , la tensión de la fuente se refleja en la carga, provocando la circulación de corriente a través de ella. Si por el contrario S está abierto,  $T_{ON} < t < T$ , el vínculo entre la fuente y carga se rompe, quedando esta última aislada de la primera. Como la carga es resistiva pura, la corriente circulante por la misma, en estas condiciones, se anula completamente.

La tensión media que existe en la carga será:

$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^{T_{ON}} v_o dt = \frac{T_{ON}}{T} \times Vg = \delta \times Vg \quad (6)$$

Donde:

$V_o$  = Voltaje de salida.

$T$  = Periodo del convertidor.

$T_{ON}$  = Tiempo de conducción.

$Vg$  = Voltaje de entrada del Chopper.

Al cociente entre  $T_{ON}$  y  $T$  se le denomina **ciclo de trabajo**,  $\delta$ .

También se puede obtener el *valor eficaz* de la tensión en la carga:

$$V_{RMS} = \sqrt{\left(\frac{1}{T} \int_0^{T_{ON}} v_o^2 dt\right)} = \sqrt{\delta} Vg \quad (7)$$

Donde:

$V_{RMS}$  = Voltaje en valor eficaz.

$T$  = Periodo.

$T_{ON}$  = Tiempo de conducción.

$v_o$  = Voltaje de salida.

$\delta$  = Ciclo de trabajo.

$Vg$  = Voltaje de entrada del Chopper.

Considerando que todos los elementos que participan en el convertidor son ideales y que no se producen pérdidas en los mismos, se puede decir que la potencia de entrada es la misma que la obtenida a la salida del convertidor. Por lo tanto:

$$P_E = P_O = \frac{1}{T} \int_0^{T_{ON}} v_o i_o dt = \frac{1}{T} \int_0^{T_{ON}} \frac{v_o^2}{R_O} dt = \delta \frac{Vg^2}{R_O} \quad (8)$$

Donde:

$P_E$  = Potencia de entrada.

$P_O$  = Potencia de salida.

$T$  = Periodo.

$T_{ON}$  = Tiempo de conducción.

$v_o$  = Voltaje de salida.

$i_o$  = Corriente de salida.

$Vg$  = Voltaje de entrada del Chopper

$R_O$  = Resistencia de carga

Se presentan tres formas diferentes de modificar el ciclo de trabajo y por la tensión de salida, las cuales son:

- a) Variando el tiempo de conducción  $T_{ON}$ , al mismo tiempo que se mantiene  $T$  fijo. Llamado también **Modulación por Ancho de Pulso (PWM)** ya que la frecuencia de la señal del convertidor se mantiene constante mientras que no ocurre así con la anchura del pulso que define el tiempo de conducción del convertidor.
- b) Variando  $T$  y conservando  $T_{ON}$  constante. Denominado **Modulación de Frecuencia** ya que es la frecuencia del convertidor la que varía. El inconveniente más destacado de este método de control se encuentra en la

generación indeseada de armónicos a frecuencias impredecibles, por lo que el diseño del consiguiente filtro se revestirá de una complejidad en algunos casos excesiva.

c) Modificando ambos.

## 2.4.2 MOSFET.

El MOSFET como menciona en [23] es un dispositivo controlado por voltaje que requiere sólo una pequeña corriente de entrada, esta característica provoca que pueda ser operado a una elevada velocidad de conmutación con tiempo de recuperación en el orden de los nanosegundos (ns). Los MOSFET de potencia están encontrando cada vez más aplicaciones en los convertidores de alta frecuencia y baja potencia. Este tipo de interruptores no tienen los problemas de los fenómenos de ruptura secundaria que presentan lo BJT. Sin embargo, los MOSFET tienen problemas de descargas electrostáticas, por lo que su manejo requiere de cuidados especiales.

El MOSFET tiene tres terminales: drenaje (D), fuente (S) y compuerta (G) como se muestra en la Fig. 38.a.

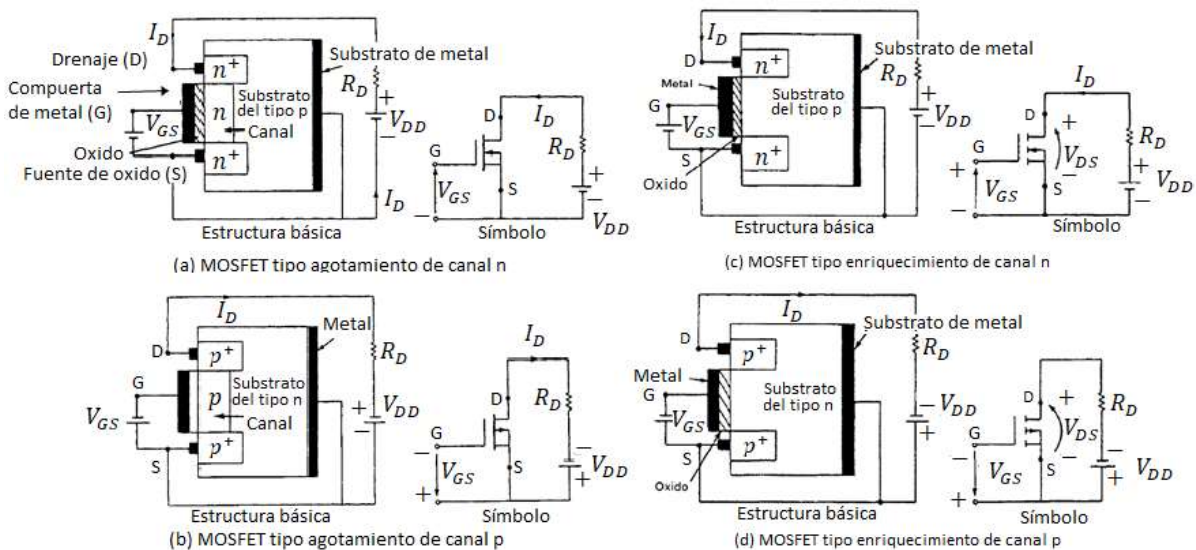


Fig. 38. MOSFET (a) tipo agotamiento canal n; (b) tipo agotamiento de canal p; (c) tipo enriquecimiento de canal n; (d) tipo enriquecimiento de canal p. Fuente: Rashid, M. (2004).

El drenaje y la fuente son los polos del interruptor equivalente, mientras de la compuerta sirve como elemento de control. Este interruptor puede funcionar en tres zonas distintas: corte, saturación y lineal, aunque cuando funciona como interruptor de potencia solo utiliza las regiones de corte y saturación.

Los MOSFET son de dos tipos: de agotamiento y de enriquecimiento. Un MOSFET tipo agotamiento de canal n se forma en un sustrato de silicio de tipo p, como se muestra en la Fig. 38.a, con dos silicios n+ fuertemente dopados para tener

conexiones de baja resistencia. La compuerta está aislada del canal mediante una delgada capa de óxido. Normalmente el substrato se conecta a la fuente. El voltaje de compuerta a fuente,  $V_{GS}$ , puede ser positivo o negativo. Si  $V_{GS}$  es negativo, algunos de los electrones del área del canal  $n$  serán repelidos y se creará una región de agotamiento por debajo de la capa de óxido, que resultará en un canal efectivo más angosto y en una alta resistencia de drenaje a fuente,  $R_{DS}$ . Si  $V_{GS}$  se hace suficientemente negativo, el canal se agotará totalmente, ofreciendo un alto valor de  $R_{DS}$  y no habrá flujo de corriente de drenaje a fuente,  $I_{DS} = 0$ . Cuando esto ocurre, el valor de  $V_{GS}$  se conoce como voltaje de estrechamiento. Por otra parte,  $V_{GS}$  se hace positivo, el canal se ensancha, e  $I_{DS}$  aumenta debido a la reducción en  $R_{DS}$ . Con un MOSFET tipo agotamiento de canal  $p$  como el que se muestra en Fig. 38.b, se invierten las polaridades  $V_{DS}$ ,  $I_{DS}$  y  $V_{GS}$ .

Un MOSFET tipo enriquecimiento de canal  $n$ , no tiene un canal físico como se puede observar en la Fig. 38.c. Si  $V_{GS}$  es positivo, un voltaje inducido atraerá a los electrones del substrato  $p$  y los acumulará en la superficie por debajo de la capa de óxido. Si  $V_{GS}$  es mayor que o igual a un valor conocido como voltaje de umbral, se acumulará un número suficiente de electrones para formar un canal virtual  $n$  y la corriente fluirá del drenaje a la fuente. Si se trata de un MOSFET tipo enriquecimiento de canal  $p$  como el de la Fig. 38.d, las polaridades de  $V_{DS}$ ,  $I_{DS}$  y  $V_{GS}$  se invierten.

### **2.4.3 Fuentes de alimentación.**

El principal objetivo de una fuente de alimentación es proporcionar un valor de tensión adecuado para el funcionamiento de cualquier dispositivo. Se encarga de convertir la entrada de tensión alterna de la red en una tensión continua. [31]

#### **2.4.3.1 Fuentes de alimentación lineales.**

Son dispositivos electrónicos que permiten controlar la tensión de salida ajustando continuamente la caída de tensión en un transistor de potencia conectado en serie entre la entrada y la salida. Es decir que operan con una corriente continua, donde el nivel de tensión a la entrada siempre debe ser superior al de salida. Las características de las fuentes lineales son:

- Diseño sencillo y económico, debido a que utilizan pocos componentes.
- Bajo rendimiento, poseen una eficiencia entre 30% y 60%.
- Disipación de calor, debido a su baja eficiencia, el resto de la energía se disipa en calor.
- Tienen un peso y volumen elevado.

#### **2.4.3.2 Fuentes de alimentación conmutadas.**

La diferencia entre las fuentes lineales y las fuentes conmutadas se fundamenta en las pérdidas en el estado de encendido al mantener conectados los interruptores en



todo el periodo de operación, mientras que las fuentes conmutadas utilizan un transistor en la zona de corte y saturación, de forma que se obtienen periodos de tiempo en que la corriente y la tensión son nulos. En consecuencia, se obtiene menor disipación de potencia y esto se logra convirtiendo la tensión de entrada en una señal cuadrada con frecuencias altas para reducir las pérdidas de conducción y bajar el nivel de densidad de potencia de los elementos pasivos de los convertidores.

Las características de este tipo de fuentes de alimentación son:

- Mayor eficiencia energética, entre 70% y 90%.
- Pequeño tamaño, peso y coste.
- Menor calentamiento de los componentes.
- Más complejas y costosas.

### **2.4.3 Convertidores CD-CD.**

Los convertidores CD-CD son fuentes de alimentación conmutadas que se encargan de convertir un voltaje de suministro constante, a los niveles de voltaje o corriente que requiera la carga bajo la técnica de activación de un interruptor de potencia controlado por PWM. En estos circuitos un factor muy importante es el de la frecuencia de conmutación ya que de esta depende la eficiencia de estos convertidores. [24]

Hoy en día los avances en la electrónica de potencia nos permiten diseñar y construir convertidores con técnicas de control moderno, número reducido de componentes, baja inversión, alta confiabilidad y muy buena eficiencia. [32]

De forma simplificada se puede pensar que realizan la misma transformación que los transformadores, pero con corriente continua. Su rango de aplicación es el mismo que el de los convertidores CA-CD, con la única diferencia de que la energía primaria de alimentación no es corriente alterna, sino continua.

Desde el punto de vista puramente técnico, este tipo de convertidores presentan algunas ventajas sobre otras formas de regulación cuando se aplican al control de accionamientos de CD:

- Pueden proporcionar una variación continua de salida, lo que se traduce también en una aceleración constante del accionamiento.
- Presentan una respuesta dinámica muy rápida.
- Tienen una elevada eficiencia.

Desde el punto de vista de su arquitectura interna, este tipo de convertidores se agrupan según su capacidad para realizar transformaciones en las que la tensión de entrada se reduce, se eleva, o ambas indistintamente.

Los convertidores de CD-CD son:

1. Convertidor reductor (Buck).
2. Convertidor elevador (Boost).
3. Convertidor reductor/elevador (Buck-Boost).
4. Convertidor Cúk.

De estos convertidores, sólo el reductor y el elevador son las topologías básicas de los convertidores que se utilizarán en este trabajo.

Se supone que el voltaje de entrada de CD a los convertidores idealmente tiene una impedancia interna de cero. Puede ser una fuente de batería; sin embargo, en la mayoría de los casos, la entrada es un voltaje de línea CA rectificado por diodos con una gran capacitancia de filtrado como se muestra en la Fig. 39, para proporcionar una impedancia y una fuente de voltaje de CD de baja ondulación o bajo rizo.

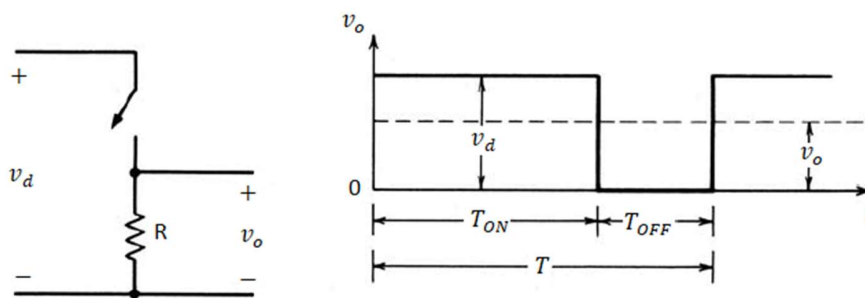


Fig. 39. Conversión de CD-CD en modo conmutación. Fuente: Mohan, N., Undeland, T., & Robbins, W. (2009).

En la etapa de salida del convertidor, un pequeño filtro se trata como parte integral del convertidor de CD a CD. Se supone que la salida alimenta una carga que se representa por una resistencia equivalente, como suele ser el caso en fuentes de alimentación CD de modo de conmutación.

#### 2.4.3.1 Control de convertidores de CD-CD.

En los convertidores de CD-CD, el voltaje medio de salida de CD debe controlarse para que iguale un nivel deseado, aunque quizá fluctúen el voltaje de entrada y la carga de salida. Los convertidores de CD-CD de modo de conmutación utilizan a uno o más interruptores para transformar CD de un nivel a otro. En un convertidor CD-CD con un voltaje de entrada dado, el voltaje medio de salida se controla mediante el control de los tiempos de encendido y apagado ( $T_{ON}$  y  $T_{OFF}$ ). Para ilustrar el concepto de conversión por el modo de conmutación, se considera el convertidor CD-CD básico que se muestra en la Fig. 39.a. El valor medio  $V_o$  del voltaje de salida  $v_o$  en la Fig. 39.b depende de  $T_{ON}$  y  $T_{OFF}$ . Un método para controlar

el voltaje de salida emplea la conmutación con una frecuencia constante (por ende, un periodo de conmutación constante  $T = T_{ON} + T_{OFF}$ ) y el ajuste de la duración de encendido del interruptor para controlar el voltaje medio de salida. [33]

En este método, llamado conmutación por modulación por ancho de pulso, la relación de trabajo del interruptor  $D$ , que se define como la proporción de la duración de encendido con el periodo de conmutación, es variada.

El otro método de control es más general, donde tanto la frecuencia de conmutación (y por tanto el periodo), como la duración de encendido del interruptor, son variados. Este método se emplea sólo en convertidores de CD-CD que usan tiristores de conmutación forzada.

La variación en la frecuencia de conmutación dificulta filtrar los componentes de ondulación en las formas de ondas de entrada y salida del convertidor. En la conmutación de PWM con una frecuencia de conmutación constante, la señal de control del interruptor que controla el estado (encendido o apagado) del interruptor se genera por medio de la comparación de un voltaje de control en el nivel de señales  $v_{control}$  con una forma de onda repetitiva, como se muestra en las Fig. 40.a y 40.b. La señal del voltaje de control se obtiene por lo general mediante la amplificación del error, o la diferencia entre el voltaje de salida real y su valor deseado.

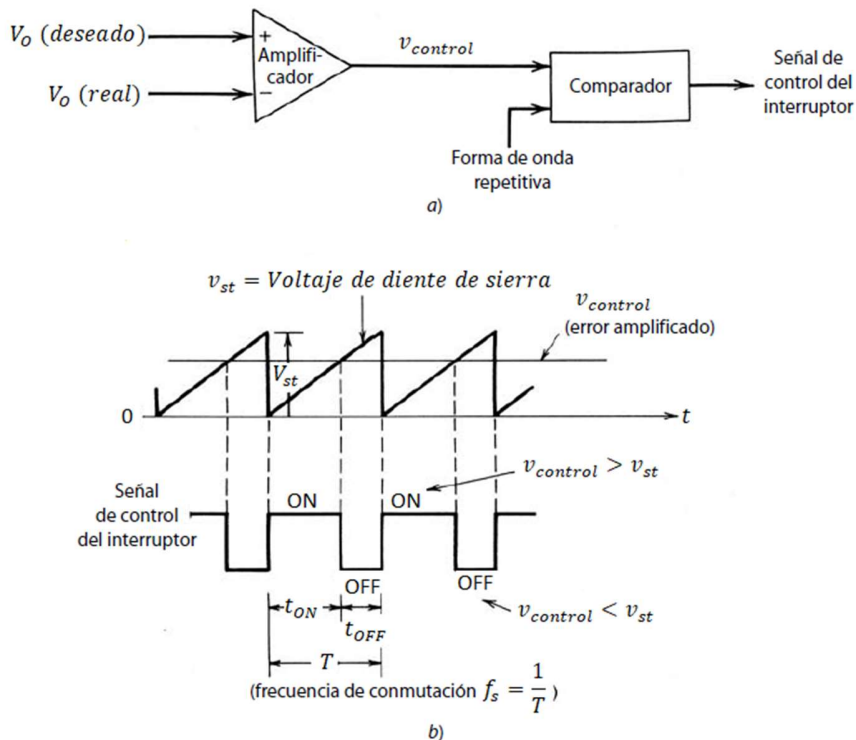


Fig. 40. Modulador por ancho de pulso. a) Diagrama de bloques. b) señales del comparador. Fuente: Mohan, N., Undeland, T., & Robbins, W. (2009).

La frecuencia de la forma de onda repetitiva con un pico constante, el cual se muestra como una señal diente de sierra, la cual establece la frecuencia de conmutación. Esta frecuencia se mantiene constante en un control PWM y se elige dentro de un rango de unos cuantos KHz a cientos de KHz. Cuando la señal de error amplificada, que varía muy lentamente con el tiempo en relación con la frecuencia de conmutación, es más grande que la forma de onda de diente de sierra, la señal de control del interruptor se vuelve alta, lo que causa que el interruptor se encienda. De lo contrario, el interruptor está apagado. En términos de  $v_{control}$  y el pico de la forma de onda de diente de sierra  $\widehat{V}_{st}$  en la Fig. 40, la relación de trabajo del interruptor se expresa como:

$$\delta = \frac{T_{ON}}{T} = \frac{v_{control}}{\widehat{V}_{st}} \quad (9)$$

Los convertidores de CD-CD pueden tener dos modos de operación:

- 1) Modo de Conducción de corriente continua.
- 2) Modo de Conducción de corriente discontinua.

En la práctica, un convertidor puede trabajar en ambos modos, los cuales tienen características considerablemente distintas. Por tanto, un convertidor y su control se deben diseñar con base en ambos modos de operación.

#### 2.4.3.2 Convertidor Reductor (Buck).

Como implica su nombre, un convertidor reductor produce un voltaje medio de salida más bajo que el voltaje CD de entrada  $V_B$ . Su aplicación principal es en fuentes de energía de CD regulada y el control de velocidad de motores de CD. [34]

El funcionamiento del convertidor Buck es sencillo, consta de un inductor controlado por dos dispositivos semiconductores los cuales alternan la conexión del inductor bien a la fuente de alimentación o bien a la carga.

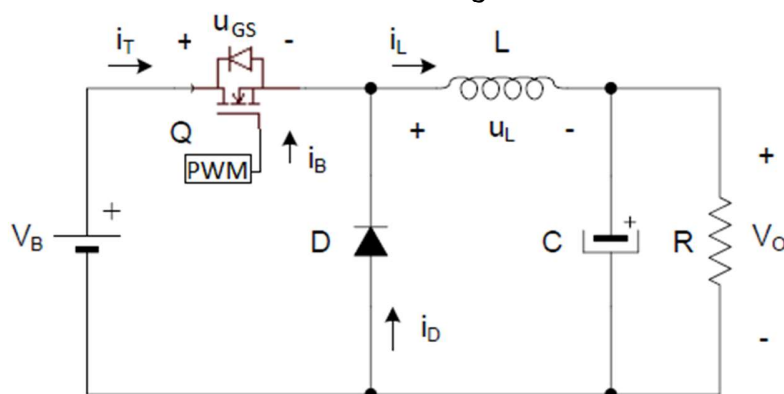


Fig. 41. Convertidor Buck. Fuente: Marcos, J. (2010).

Cuando el interruptor Q está cerrado en el convertidor reductor de la Fig. 41, el diodo se polariza en inversa por lo que no fluye corriente por él, este circuito equivalente se muestra en la Fig.42. [35]

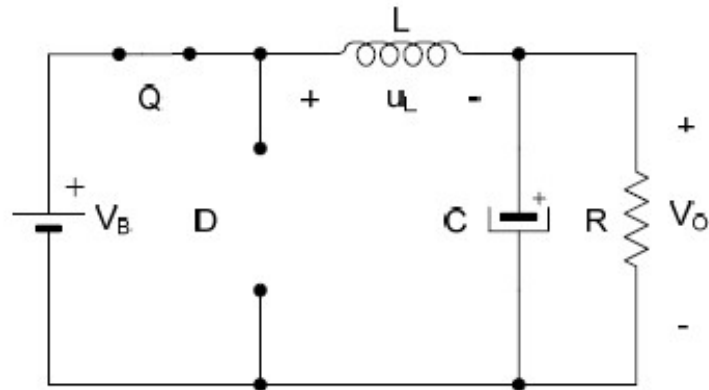


Fig. 42. Circuito equivalente del convertidor Buck en circuito cerrado. Fuente: Marcos, J. (2010).

Cuando el interruptor está abierto, el diodo se polariza en directa para dejar pasar la corriente de la bobina y se aplica el circuito equivalente de la Fig. 43.

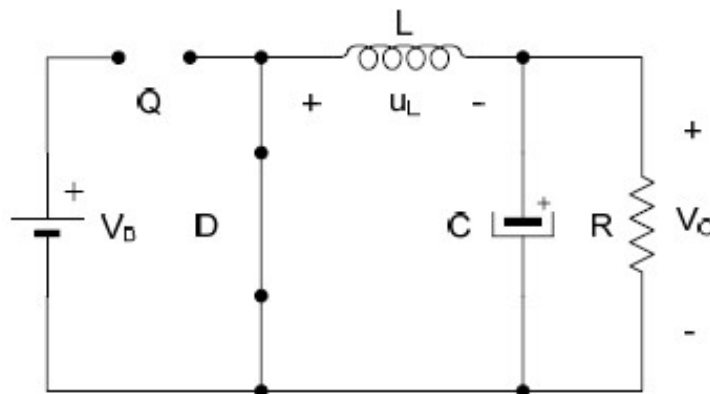


Fig. 43. Circuito equivalente del convertidor Buck en circuito abierto. Fuente: Marcos, J. (2010).

La energía almacenada en la bobina se incrementa en estado ON (interruptor cerrado) y se decrementa durante el estado OFF (interruptor abierto). La bobina se usa para transferir energía desde la entrada a la salida.

En la Fig. 44 se muestran las formas de onda de la evolución de las tensiones y corrientes con el tiempo en un convertidor Buck.

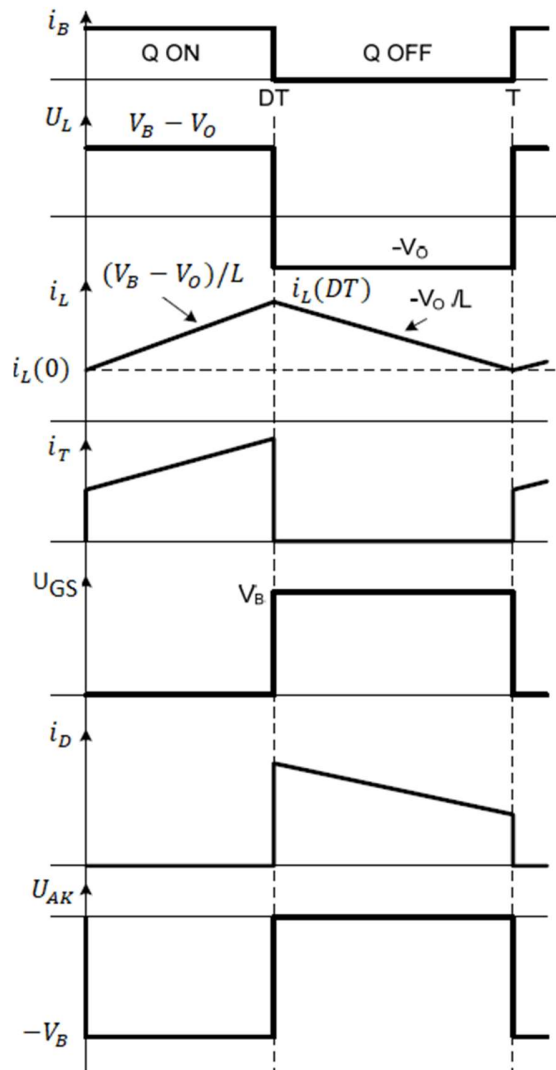


Fig. 44. Evolución de las tensiones y corrientes con el tiempo en un convertidor Buck ideal.  
Fuente: Marcos, J. (2010).

Al variar la relación de trabajo  $t_{ON}/T$  del interruptor, se controla  $V_O$ . Otra observación importante es que el voltaje medio de salida  $V_o$  varía linealmente con el voltaje de control, como es el caso en amplificadores lineales. En las aplicaciones reales, el circuito antecedente tiene dos desventajas: 1) En la práctica, la carga sería inductiva. Incluso con una carga resistiva, siempre habría cierta inductancia de dispersión. Esto significa que el interruptor tendría que absorber (o disipar) la energía inductiva y por lo mismo podría quedar destruido. 2) El voltaje de salida fluctúa entre cero y  $V_d$ , lo que no es aceptable en la mayoría de las aplicaciones. El problema de la energía inductiva almacenada se supera mediante un diodo. Las fluctuaciones del voltaje de salida disminuyen mucho cuando se usa un filtro pasa bajas, que consiste en un inductor y un capacitor. [15]

El convertidor reductor requiere de un solo transistor, es sencillo y tiene una alta eficiencia, mayor del 90%. Proporciona una polaridad de voltaje de salida y corriente unidireccional de salida. En caso de un posible corto circuito a través de la trayectoria del diodo, requiere un circuito de protección. [33]

### 2.4.3.3 Convertidor elevador (Boost).

La Fig. 45 muestra un convertidor elevador. Su aplicación principal es en fuentes de energía de CD regulada y en el frenado regenerativo de motores de CD. Como implica su nombre, el voltaje de salida siempre es más grande que el voltaje de entrada. [36]

Para analizar el principio de funcionamiento, se dice que el convertidor funciona en conducción continua cuando la corriente que circula por la inductancia es diferente de cero; en caso contrario se dice que opera en conducción discontinua.

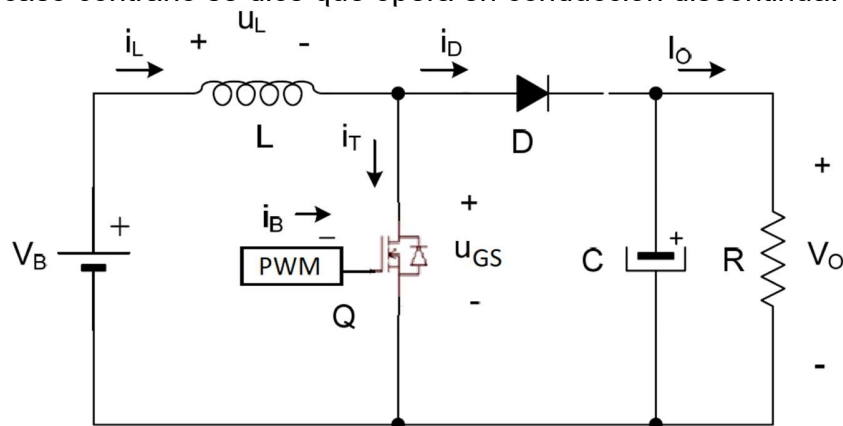


Fig. 45. Diagrama del convertidor Boost. Fuente: Marcos, J. (2010).

Q representa el interruptor mostrado en la Fig. 45, éste es un interruptor controlado que opera en los estados ON y OFF de acuerdo con un ciclo de trabajo que permite regular la tensión de salida. En conducción continua se encuentran dos secuencias de funcionamiento correspondientes a los dos estados posibles del interruptor. [37]

Q a ON: Cuando el interruptor conduce, el diodo está polarizado en inversa y permanece bloqueado. Durante esta secuencia la inductancia almacena energía por estar expuesta a la tensión, en tanto que el capacitor mantiene la tensión de salida. Las formas de onda, así como los circuitos equivalentes con los dos estados del interruptor se muestran en la Fig. 46.

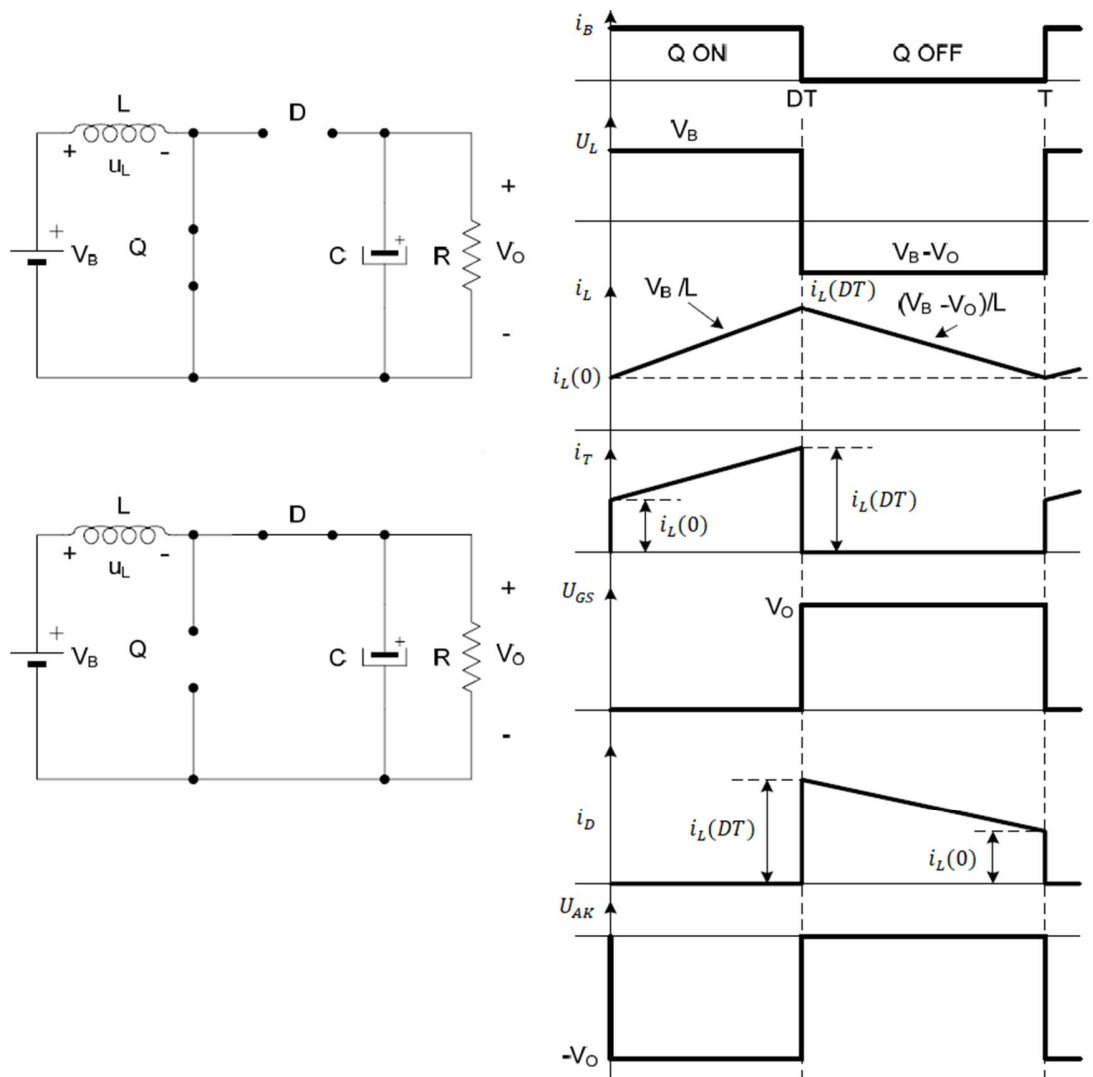


Fig. 46. Circuitos equivalentes de los estados del interruptor en el convertidor Boost, la evolución de las tensiones y corrientes con el tiempo. Fuente: Marcos, J. (2010).

Cuando el interruptor no conduce, Q a OFF, la energía almacenada en la bobina, fuerza la conducción del diodo y descarga sobre la salida la energía almacenada en la secuencia anterior. Durante este estado, la corriente en la inductancia decrece con una pendiente definida por la diferencia de tensiones entre la entrada y la salida.

Un convertidor elevador puede elevar el voltaje de salida sin necesidad de un transformador, debido a que sólo tiene un transistor su eficiencia es alta. La corriente de entrada del convertidor es continua, no obstante, a través del transistor de potencia debe fluir una corriente pico alta.

El voltaje de salida es muy sensible a cambios en el ciclo de trabajo y puede resultar difícil estabilizar el regulador. La corriente promedio de salida es menor que la



corriente promedio del inductor y una corriente más alta fluirá a través del capacitor de filtro, dando como resultado el uso de un capacitor y un inductor de mayor tamaño que los correspondientes en un regulador reductor. [33]

## 2.5 Tecnología de baterías.

Las baterías y las pilas son hasta ahora la fuente de energía que mejor se adapta a las necesidades de la era de la tecnología; sin embargo, cada tipo de dispositivo electrónico requiere de un tipo de pila o batería que se adapte a sus necesidades de suministro y tamaño. Cada uno de los diferentes tipos de baterías tiene componentes y desempeños característicos; así mismo se requieren cuidados especiales en su selección, manejo y disposición final, dado que emplean con frecuencia materiales poco biodegradables y en algunos casos altamente tóxicos. [38]

El término pila o batería, se asigna al dispositivo que convierte la energía química en eléctrica. Todas las baterías consisten en un electrolito (que puede ser líquido, sólido o en pasta), un electrodo positivo (cátodo) y un electrodo negativo (ánodo). El electrolito es un conductor iónico; uno de los electrodos desprende electrones y el otro electrodo los recibe. Al conectar los electrodos al circuito que hay que alimentar, se produce una corriente eléctrica. [39]

Existen de dos tipos: baterías primarias y baterías secundarias.

- **Baterías primarias:** Se caracterizan por que la conversión de energía química a eléctrica es irreversible, o sea después que la batería se ha descargado completamente no se puede volver a cargar.
- **Baterías secundarias:** Más conocidas como baterías recargables. Estas al descargarse, pueden ser recargadas inyectándoles corriente continua desde una fuente externa.

En general el funcionamiento de una batería, se basa en una celda electroquímica como se muestra en la Fig. 47. Las celdas electroquímicas tienen dos electrodos: El Ánodo y el Cátodo. El ánodo se define como el electrodo en el que se lleva a cabo la oxidación (cede electrones) y el cátodo donde se efectúa la reducción (capta electrones). Los electrodos pueden ser de cualquier material que sea un conductor eléctrico, como metales o semiconductores. Para completar el circuito eléctrico, las disoluciones se conectan mediante un conductor por el que pasan los cationes y aniones, conocido como puente de sal (o como puente salino), para que se mantengan neutras. Los cationes disueltos se mueven hacia el Cátodo y los aniones hacia el Ánodo. La corriente eléctrica fluye del ánodo al cátodo porque existe una diferencia de potencial eléctrico entre ambos electrolitos. [40]

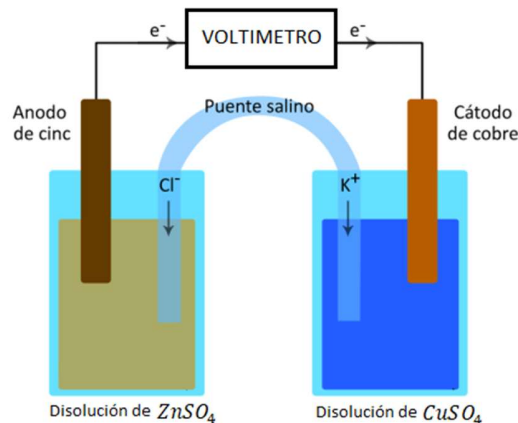


Fig. 47. Reacción en una celda electroquímica. Fuente: Vergara, M. (s.f.).

Tres características que definen una batería:

- **Cantidad de energía** que puede almacenar.
- **Máxima corriente** que puede entregar (descarga).
- **Profundidad de descarga** que puede sostener.

La cantidad de energía que puede ser acumulada por una batería está dada por el número de Watt/horas (Wh) de la misma. La capacidad (c) de una batería de sostener un régimen de descarga está dada por el número de Amperes/horas (Ah).

**Cantidad de energía:** Para una dada batería, el número de Wh puede calcularse multiplicando el valor del voltaje nominal por el número de Ah. Para un ejemplo de una batería de sistemas fotovoltaicos, llamadas solares, se tiene:

$$6V \times 200 Ah = 1,200 Wh (1.2 KWh)$$

Donde 6V, es su voltaje nominal y 200Ah su capacidad.

**Corriente máxima:** El número de Ah de una batería es un valor que se deriva de un régimen de descarga especificado por el fabricante. Para baterías solares, por ejemplo, el procedimiento de prueba ha sido estandarizado por la industria. Una batería, inicialmente cargada al 100%, es descargada, a corriente constante, hasta que la energía en la misma se reduce al 20% de su valor inicial. El valor de esa corriente de descarga, multiplicado por la duración de la prueba (20 horas es un valor típico), es el valor en Ah de esa batería. Si una batería tiene una capacidad (c) de 200 Ah para un tiempo de descarga de 20hrs, el valor de la corriente nominal es de 10A. Para eliminar ambigüedades algunos fabricantes especifican las baterías como un número fraccionario, por ejemplo, para c=200Ah una de tipo c/20=10A quiere decir que la batería puede entregar 10A por 20 horas.

Por otro lado, no se puede intentar tener una corriente mayor que la nominal. Al querer aumentar la corriente, se acelera el proceso electroquímico causando un aumento de la resistencia interna de la batería. Este incremento disminuye el voltaje

de salida, autolimitando la capacidad de sostener corrientes elevadas en la carga. En el caso contrario, si la corriente de descarga es menor que la especificada, por ejemplo, 5A, la relación Ah es válida. La batería de 200Ah del ejemplo puede sostener este valor de corriente por 40 horas.

**Profundidad de descarga (PD):** representa la cantidad de energía que puede extraerse de una batería. Este valor está dado en forma porcentual. Si la batería del ejemplo entrega 600 Wh, la PD es del 50%. Cuando se efectúa la prueba para determinar la capacidad en Ah de una batería solar la PD alcanza el 80%.

### 2.5.1 Tipos de baterías.

Los tipos de baterías más usados son:

- Plomo-acido (Pb-acido)
- Nickel-cadmio (NiCd)
- Nickel-hidruro metálico (NiMH)
- Ion-Litio (Li-ion)
- Polímero-Litio (Li-poly )
- Aire-zinc
- Celdas de combustible

**Plomo-acido (Pb-ácido):** es el tipo de batería recargable más común por su buena relación de desempeño-costo aunque es la de menor densidad de energía por peso y volumen.

Esta batería cuenta con varias versiones:

- La versión shallow-cycle o de ciclo corto es usada en automóviles, en los cuales se necesita una corta explosión de energía que es forzada desde la batería para encender el motor.
- La versión deep-cycle o de ciclo profundo, diseñada para repetidos ciclos de carga y descarga. La mayoría de las aplicaciones requiere este tipo de baterías, ej., vehículos industriales embarcaciones, energía fotovoltaica.
- La versión sellada "gel-cell" con aditivos, los cuales vuelven el electrolito en un gel antiderrames, está pensada para ser montada de lado o de invertido pero su alto costo la limita aplicaciones en aviones militares.

**Nickel-cadmio (NiCd):** se caracteriza por sus celdas selladas, por tener la mitad del peso y por ser más tolerante a altas temperaturas, que una batería de plomo-acido convencional.

Tiene el efecto de memoria lo cual acelera su proceso de descarga. Debido a regulaciones ambientales ha sido reemplazada por NiMH e Ion-litio, en notebooks y en otros tipos de electrónica de alto precio.

**Nickel-hidruro metálico (NiMH):** es una extensión de la tecnología de NiCd, ofrece una mayor densidad de energía y el ánodo está hecho de metal hidruro evitando los problemas ambientales de la de NiCd. Además, su efecto memoria es casi despreciable. Sin embargo, no es capaz de entregar altos picos de potencia, tiene un alto grado autodescarga y es muy peligrosa si es sobrecargada. Aún es de precio elevado, aunque se estima que su costo disminuirá al producir vehículos eléctricos a gran escala.

**Ion-litio:** es de una nueva tecnología, la cual ofrece una densidad de energía de 3 veces la de una batería plomo-ácido. Esta gran mejora viene dada por su bajo peso atómico 6.9 contra 209 para la de plomo. Además, cuenta con un voltaje por celda de 3.5V, lo cual disminuye el número de celdas en serie para alcanzar cierto voltaje, reduciendo su costo de manufactura. Tiene una muy baja tasa de autodescarga. Sin embargo, su rápida degradación y sensibilidad a las elevadas temperaturas, que pueden resultar en su destrucción por inflamación o incluso explosión, requieren en su configuración como producto de consumo, la inclusión de dispositivos adicionales de seguridad, resultando en un coste superior que ha limitado la extensión de su uso a otras aplicaciones. Su uso se ha popularizado en aparatos como teléfonos móviles, agendas electrónicas, computadoras portátiles y lectores de música.

**Polímero-Litio (Li-poly):** es una batería de litio con un polímero sólido como electrolítico. Estas baterías tienen una densidad de energía de entre 5 y 12 veces las de Ni-Cd ó Ni-MH, a igualdad de peso. A igualdad de capacidad, las baterías de Li-Po son, típicamente, cuatro veces más ligeras que las de Ni-Cd. La gran desventaja de estas baterías es que requieren un trato mucho más delicado, bajo riesgo de deteriorarlas irreversiblemente o, incluso, llegar a producir su ignición o explosión. Un elemento de Li-Po tiene un voltaje nominal, cargado, de 3.7 V. Nunca se debe descargar una batería por debajo de 3.0 V por celda; nunca se la debe cargar más allá de 4.3 V por celda.

**Aire-zinc:** Con una fabricación más barata y capacidades de almacenamiento que pueden superar a las populares Ion de Litio, que se encuentran en la mayoría de las laptops, teléfonos y otros dispositivos electrónicos. Las baterías zinc-aire son del tipo primarias, o sea que una vez agotada la carga, no pueden recargarse sino que hay que extraer el zinc y cargarlo fuera de la batería. Sin embargo, la carga del zinc es fácil y rápida. En operación, una masa de partículas de zinc forma un ánodo poroso, que está saturado con un electrolito. El oxígeno del aire reacciona en el cátodo y forman iones hidroxilo que migran hacia la pasta de zinc y forma zincato, liberando electrones para viajar hacia el cátodo. El zincato decae en óxido de zinc y agua vuelve al electrolito. Las pilas a base de zinc tienen como principal ventaja la posibilidad de ser recicladas sin límite, sin perder ni sus cualidades químicas, ni sus cualidades físicas.

**Celda de combustible:** Una pila de combustible, también llamada celda de combustible es un dispositivo electroquímico de conversión de energía similar a una batería, pero se diferencia de esta última en que está diseñada para permitir el reabastecimiento continuo de los reactivos consumidos, es decir, produce electricidad de una fuente externa de combustible y de oxígeno en contraposición a la capacidad limitada de almacenamiento de energía que posee una batería. Tiene distintas aplicaciones como submarinos, automóviles, centrales eléctricas, etc.

En la Tabla IV se muestran las características de los tipos de baterías.

TABLA IV. Características de los tipos de baterías. Fuente: M. Vergara, 2016.

Tipo	Energía/ peso (Wh/kg)	Tensión por elemento (V)	Duración (número de recargas)	Tiempo de carga (horas)	Auto descarga por mes (% del total)
Plomo	30-50	2	1000	8-16	5
Ni-Cd	48-80	1.25	500	10-14	30
Ni-Mh	60-120	1.25	1000	2-4	20
Li-ion	110-160	3.16	4000	2-4	25
Li-Po	100-130	3.7	5000	1-1.5	10
Zinc-aire	140-180	1.2	500	-----	-----
Celda de combustible	Dado por los estanques de H	1.2	NA	Debe agregarse combustible	-----

### 2.5.2 Métodos de carga.

Los métodos disponibles son: método de carga con corriente semi-constante, método de carga con corriente-constante, método de carga con voltaje-constante y método de carga con voltaje constante en dos etapas. Los métodos de carga con voltaje semi-constante y con voltaje constante normalmente se usa para baterías que operan en servicios cíclicos. El método de carga con voltaje constante generalmente se usa para baterías en servicio de respaldo (carga lenta o de flotación). También, el método de corriente semi-constante se usa para cargas suplementarias de la batería con períodos largos de almacenaje. [41]

- **Método de Carga con corriente semi-constante (método simplificado).** Este método, a la cual se refieren como método simplificado, es fácil de utilizar y es ampliamente usado para baterías de uso cíclico. El cargador consta de un transformador, diodo y resistencia. La impedancia de estos

elementos asegura que la batería se cargue sin cambios excesivos en la corriente de carga. Con este método, mientras que se hace la carga, el voltaje de la batería aumenta mientras que la corriente de carga disminuye como se puede ver en la Fig. 48. La dificultad con este método es que la corriente de carga circula en grandes cantidades en la etapa final y causa sobrecarga. Se debe tener cuidado de evitar cargar la batería por más tiempo que el período especificado.

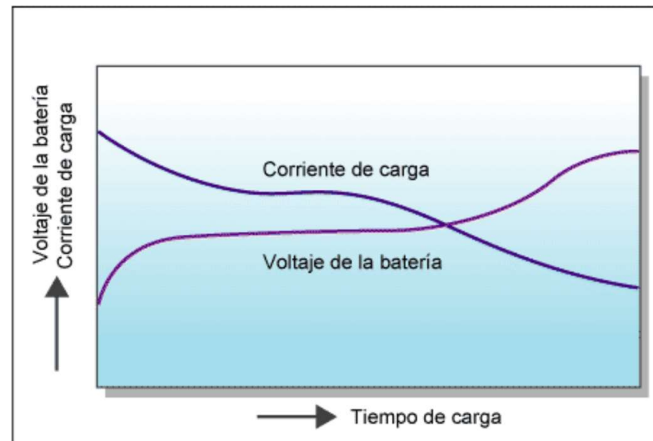


Fig. 48. Característica del método de carga con corriente semi-constante. Fuente: Hitachi Chemical (2016).

- **Método de Carga con corriente constante.** Este método consiste en cargar la batería con la corriente constante. Con este método es fácil calcular el período y la cantidad de carga. Para hacerlo un circuito costoso se requiere para obtener una corriente constante precisa. Por ello, este método de carga muy poco se usa para usos generales. La Fig. 49 muestra la característica del método de carga con corriente constante.

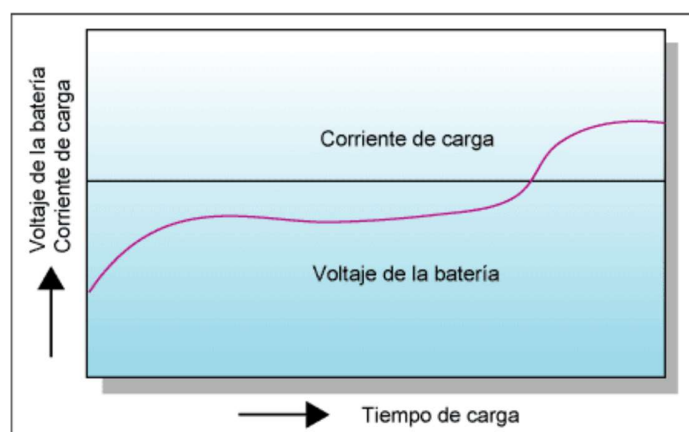


Fig. 49. Característica del método de carga con corriente constante. Fuente: Hitachi Chemical (2016).

- Método de Carga con voltaje constante (Método de Carga con corriente-constante y voltaje-constante).** Este método consiste en aplicar un voltaje constante a la batería con una unidad de voltaje constante. Este método de carga utiliza un voltaje diferente entre su voltaje y el voltaje de la batería. Inicialmente la corriente de carga es alta y disminuye al ir completando la carga. Es necesario fijar el voltaje de carga de acuerdo a las características de carga y la temperatura de la batería. Un voltaje incorrecto puede provocar una sobrecarga o baja de carga. Debido a que existe una corriente alta al comienzo, este método requiere de una unidad de carga de alta capacidad que resultaría más costosa. Por ello, el método de carga con corriente-constante, voltaje-constante con corriente inicial limitada es la más usada para baterías de uso cíclico y de respaldo. En la Fig. 50 se muestra la característica de carga con voltaje-constante y corriente-constante.

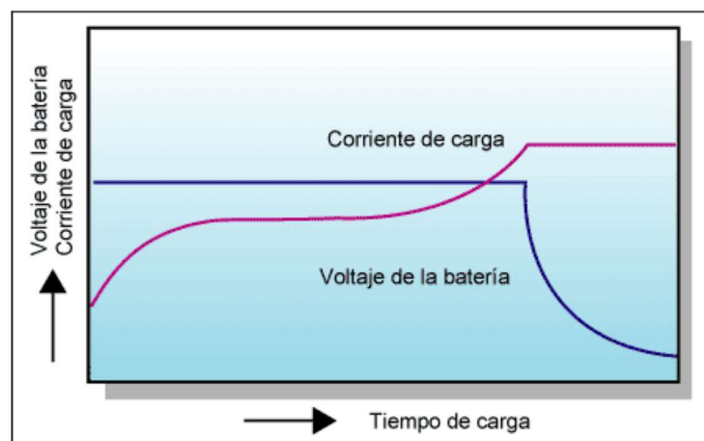


Fig. 50. Característica de Carga con voltaje-constante y corriente-constante. Fuente: Hitachi Chemical (2016).

- Método de Carga con voltaje constante en dos etapas.** Este método utiliza dos etapas de voltaje constante. Inicialmente se usa la fase con un alto voltaje fijo para la carga. Cuando casi se completa la carga y el voltaje de carga de la batería ha aumentado a un valor determinado (con la corriente de carga disminuida), la segunda fase se utiliza con una corriente y voltaje de carga menor como se observa en la Fig. 51. Este método permite carga rápida para servicio cíclico, sin la posibilidad de ocasionar una sobrecarga aún después de una carga por un largo período. Este método también permite carga rápida para usos de respaldo.

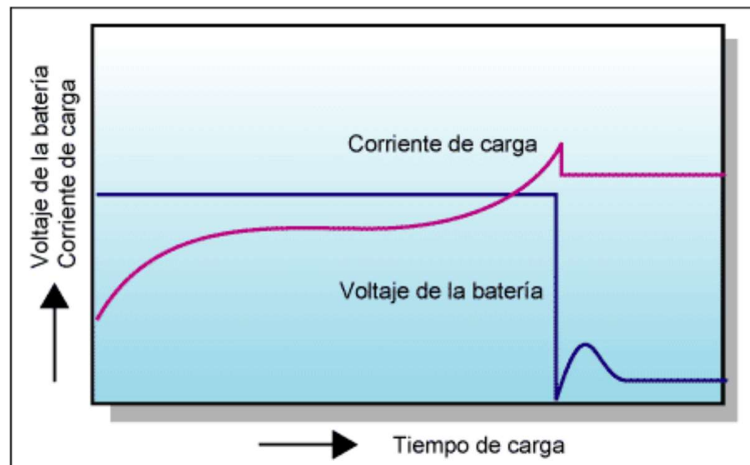


Fig. 51. Característica del Método de Carga con voltaje constante en dos etapas. Fuente: Hitachi Chemical (2016).

## 2.6 Máquinas hidráulicas.

Las máquinas hidráulicas o máquinas de fluido son aquellas que intercambian energía con el fluido que está contenido o que circula por su interior, es decir, el fluido comunica la energía que absorbe la máquina, o bien el fluido es el que recibe la energía que la máquina le transmite. [42]

### 2.6.1 Clasificación.

Las máquinas hidráulicas pueden clasificarse según diversos criterios.

Una primera clasificación surge de clasificar la dirección en que tiene lugar el intercambio de energía:

- Si el fluido tiene una energía disponible, puede cederla a la máquina a su paso por ella produciendo un trabajo: máquina productora de energía mecánica o generadora (por ejemplo, las turbinas hidráulicas, los generadores eólicos, los motores hidráulicos y neumáticos, etc.).
- Por el contrario, se puede aumentar la energía de un fluido aplicando una energía mecánica exterior: máquina consumidora de energía mecánica o motora (por ejemplo, las bombas, los ventiladores y los compresores).

Según la compresibilidad del fluido se clasifican en:

- Máquinas de fluido compresible o térmicas (turbinas de vapor, turbinas de gas y turbocompresores).
- Máquinas de fluido incompresible o hidráulicas (turbinas hidráulicas, bombas y ventiladores), en las que el fluido no experimenta cambios apreciables de densidad a su paso a través de la máquina.



## **2.6.2 Turbina.**

Una turbina es una máquina, que mediante ella atraviesa de manera constante un fluido el cuál a través del movimiento genera una energía mecánica.

Las turbinas están compuestas por una o dos ruedas donde son montadas paletas, a las cuales se les llama estator y rotor que es la impulsada por dicho fluido, arrastrando el eje donde se genera el movimiento giratorio. [43]

### **2.6.2.1 Turbina hidráulica.**

Se puede definir como una máquina que transforma la energía hidráulica que aporta un fluido en energía mecánica.

En una turbina el fluido atraviesa el rotor, que es la parte principal y la única móvil, para que esa energía sea aprovechada en el eje obteniéndose así una energía mecánica.

#### **2.6.2.1.1 Clasificación.**

Las turbinas pueden clasificarse de maneras muy diversas dependiendo de sus características y su funcionamiento. La clasificación más importante es debido a su funcionamiento la cual las divide en turbinas de acción y turbinas de reacción.

##### **a) Turbinas de acción.**

Son aquellas en las que el agua sale del distribuidor a presión ambiente y llega al rotor con esa misma presión, es decir un chorro de agua libre choca con un elemento giratorio de la turbina.

Ejemplos de este tipo de turbinas son Pelton y las de flujo cruzado como son la Michell-Banki y Ossberger.

##### **b) Turbinas de reacción.**

Son aquellas en las que el agua sale del distribuidor con cierta presión manométrica positiva que se va perdiendo a su paso en el rotor, a la salida del cual la presión manométrica puede ser nula o negativa. Por lo tanto, se intercambia tanta energía cinética como de presión. En esta clasificación las turbinas más utilizadas son Hélice, Kaplan, Bulbo, Dériaz, Staflo y Francis.

##### **c) Turbina de flujo cruzado.**

Es una turbina de construcción simple, no se necesita mucha tecnología para poder construirla. Las dos partes principales de este tipo de turbina son el rotor y el conjunto de elementos que conforman la carcasa.

La eficiencia de la turbina de flujo cruzado es del 80% y mayor, por lo tanto, es ideal para pequeñas centrales hidroeléctricas. En este tipo de turbina el flujo de agua atraviesa en rotor, de ahí proviene su nombre. La Fig. 52 muestra el flujo de agua en la turbina.

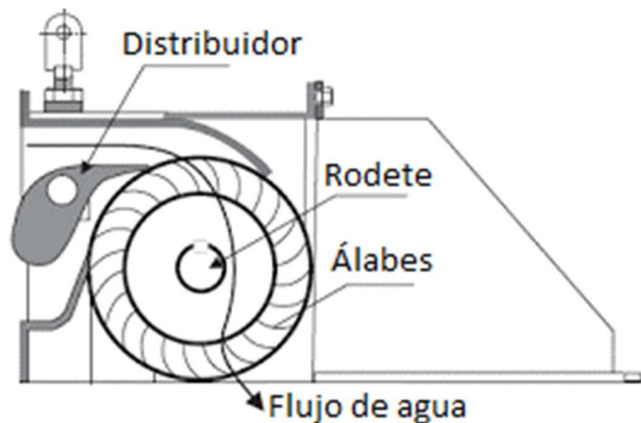


Fig. 52. Flujo de agua en la turbina de flujo cruzado. Fuente: Rojas, A. (2017)

Las turbinas hidráulicas se presentan en diferentes modelos que integran las características mencionadas anteriormente. Cada tipo de turbina se usa de acuerdo a la necesidad y a la forma en que se presente el fluido.

- a) **Turbina Kaplan:** Es una turbina del tipo axial que, además, tiene la particularidad de variar el ángulo de las palas mientras funciona. Se ha diseñado para ser usada en saltos de agua pequeños, pero con caudales grandes. Se trata de una turbina de reacción.
- b) **Turbina Hélice:** Con válvulas regulables, como el caso anterior, pero con el ángulo de las paletas fijo. En vez de cambiar el ángulo, es posible cambiar la velocidad del rodete.
- c) **Turbina Pelton:** Es una turbina con flujo transversal, con admisión parcial. Se dice que tiene cucharas en vez de palas o alabes. Son diseñadas para saltos de agua grandes pero caudales pequeños. Se considera una turbina de acción.
- d) **Turbina Francis:** Para flujo mixto y de reacción. Hay diseños elaborados que permiten el cambio de los ángulos de las paletas durante el funcionamiento. Trabaja con saltos y caudales medios.
- e) **Turbina Ossberger/Banki/Michell:** Es una turbina con libre desviación, admisión parcial y radial. Se considera una turbina de régimen lento por el número de revoluciones específicas. Ha sido diseñada para saltos medios.

# 3. DISEÑO Y SIMULACIONES.

En este capítulo se presenta el diseño y simulación de un banco de pruebas de un sistema de generación de energía en las tuberías de agua potable que descienden del tinaco en las casas. Se presentan los cálculos y análisis, de la turbina, los convertidores Buck y Boost, así como las simulaciones del control de velocidad y el circuito de recuperación de energía en los en los softwares PSIM y Proteus donde se muestra el comportamiento de la emulación del sistema funcional bajo condiciones reales.

### 3.1 Esquema del sistema de generación de energía.

El sistema consta de una turbina instalada directamente en la tubería de agua potable que está conectada directamente hacia el tinaco, dicha turbina esta acoplada por una flecha hacia un generador de imanes permanentes, cuya energía generada se traslada hacia un circuito de rectificación y filtrado. Posteriormente, el voltaje obtenido se conducirá hacia un convertidor CD-CD Buck, el cual disminuirá la tensión a 5V y después se incluye un convertidor CD-CD para elevar la tensión a 12V, lo que permitirá cargar las baterías

En la Fig. 53 se muestra el esquema del sistema de generación de energía, el cual servirá como base para el desarrollo del banco de pruebas. A continuación, se describen cada una de sus partes.

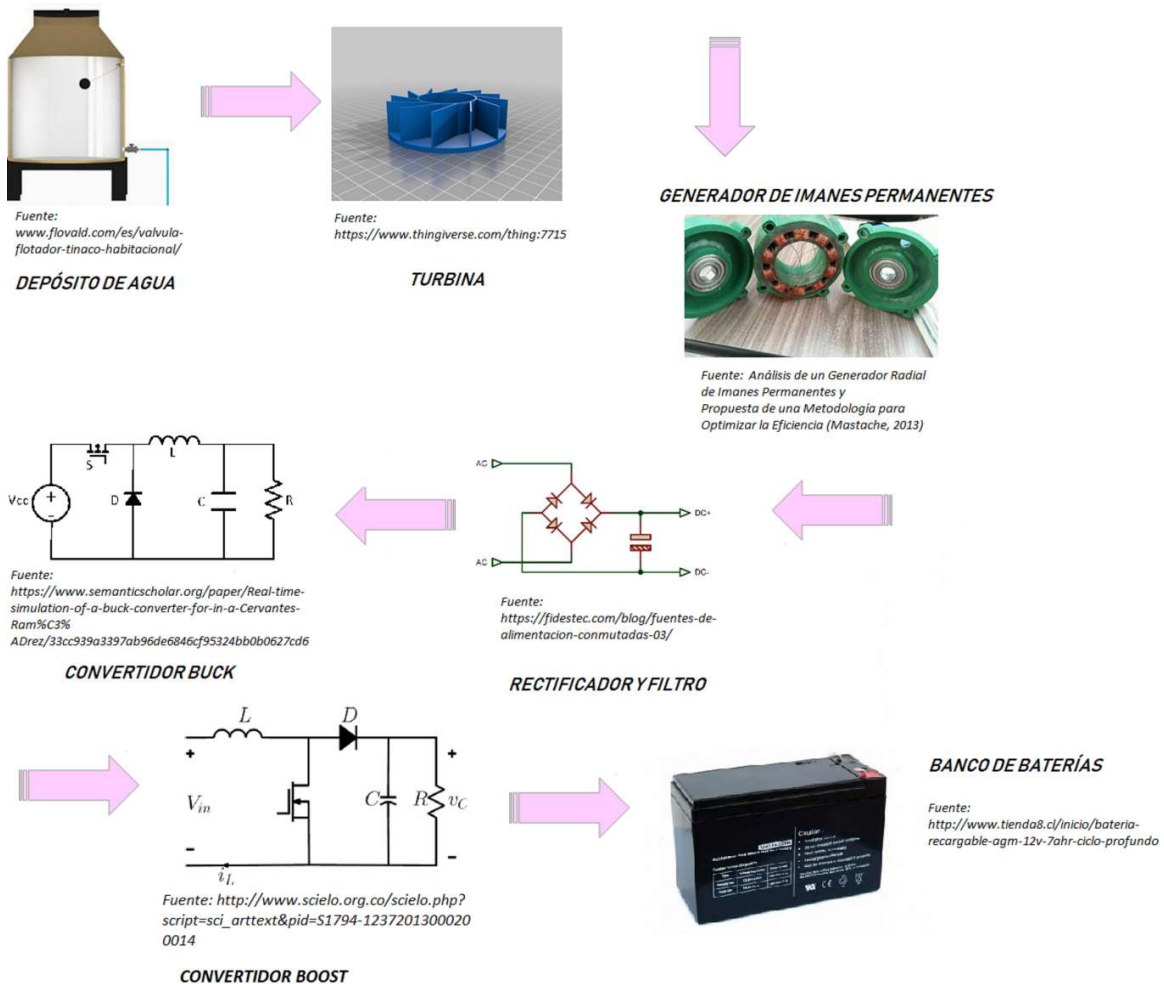


Fig. 53. Diagrama del sistema de recuperación de energía. Fuente propia.

### 3.1.1 Depósito de agua y turbina.

Las instalaciones hidráulicas tienen la función de abastecer de agua los diferentes tipos de edificaciones y dentro de estos, proceder a la distribución de ella hasta el último elemento o aparato sanitario que la necesite.

El abastecimiento de agua puede proceder de cualquier fuente como ríos, presas, acueductos, etc. Cuando la distribución se hace para edificios de una o dos plantas, y la presión hidráulica y abastecimiento son adecuados, de la entrada parten tuberías de distribución hacia cada aparato sanitario. A ese sistema de suministro se le llama sistema de presión directa del acueducto. En caso de presiones insuficientes, o cuando el suministro es regulado para determinadas horas, se emplea el sistema de tanque elevado, o por gravedad, o de tanque a presión.

Cualquiera de ellos tiene como característica común, la necesidad de almacenamiento del agua. Este almacenamiento se realiza en las casas habitación a través de tinacos.

Dichos tinacos se encuentran instalados en la parte superior de las construcciones, cuya conexión desciende hacia los muebles por tuberías, generalmente de cobre, que es la más utilizada para casas habitación por su alta resistencia a temperaturas altas y cuya medida estándar es de 19 mm de diámetro. En estas tuberías existe energía potencial y cinética que no es aprovechada, por lo tanto, este movimiento puede ser aprovechado para hacer girar una turbina.

Para calcular la velocidad del flujo de agua en las tuberías es necesario comprobar el caudal que atraviesa dicha tubería, para ello se hace una estimación de la velocidad del agua que fluye a través del orificio del tinaco.

De acuerdo al Teorema de Torricelli que es una aplicación del principio de Bernoulli se estudia el flujo de un líquido contenido en un recipiente a través de un orificio bajo la acción de la gravedad, por lo tanto, se puede calcular el caudal de salida de un líquido por un orificio. El diagrama del teorema de Torricelli se muestra en la Fig. 54.

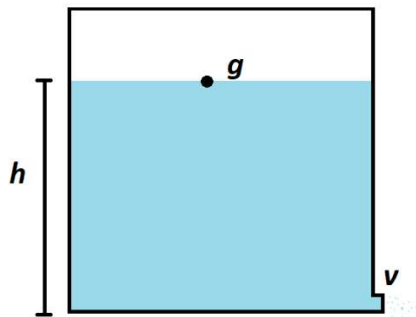


Fig. 54. Esquema del teorema de Torricelli. Fuente Propia.

La velocidad de salida de un fluido por un orificio es la misma que adquiere un cuerpo que cayese libremente, partiendo del reposo, desde una altura  $h$ . Esta velocidad se represente por la ecuación:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (10)$$

Por lo tanto, podemos calcular la velocidad con la que fluye el agua desde el orificio del tanque de almacenamiento a partir de la ecuación 10. En la Tabla V se muestra una comparación entre las velocidades a las que fluye el agua a través del orificio del tinaco según el número de habitantes del hogar y la capacidad del tinaco.

TABLA V. Relación de la velocidad del agua en las tuberías respecto a la capacidad del tinaco.  
Fuente Propia

Capacidad (en litros)	Altura (en metros)	Personas	Velocidad (en m/s)
450	0.99	2	4.40
600	1.12	3	4.68
750	1.02	4	4.47
1,100	1.39	5	5.2
2,500	1.60	15	5.6

La Fig. 55 muestra las medidas convencionales de los tinacos utilizados en las casas habitación.

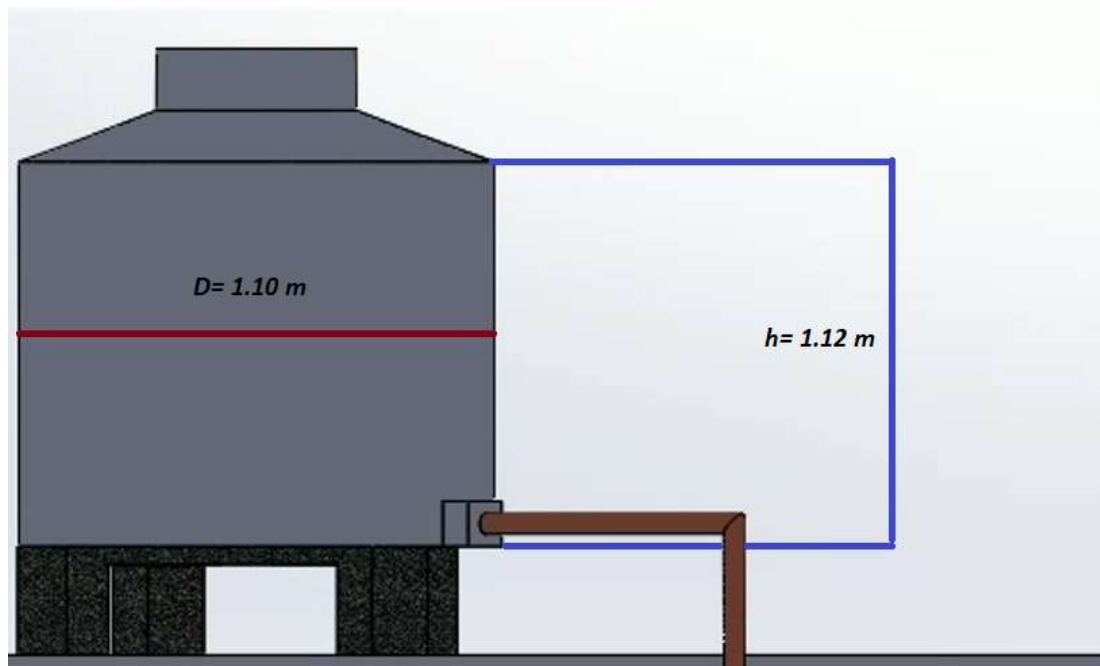


Fig. 55. Diagrama de las medidas del tinaco. Fuente propia.

Se puede calcular el volumen del tinaco a partir de la ecuación:

$$V = \pi \times r^2 \times h \quad (11)$$

Donde:

V= volumen del tinaco

r= radio de la circunferencia del tinaco

h= altura del tinaco

Sustituyendo los datos de las medidas del tinaco se obtiene:

$$V = \pi \times 0.55^2 \times 1.12 = 1100 \text{ l}$$

El volumen total del tinaco es de 1100 l, con este resultado se puede calcular los litros por minuto que descienden al bañarse, lavar la ropa o lavar los trastes, a través de una prueba experimental en donde se estima la cantidad de tiempo que tarda en descender un litro de agua. Los resultados se muestran en la Tabla VI.

*Tabla VI. Relación de litros por minuto de agua que descienden por las tuberías al realizar algunas actividades. Fuente propia*

	Tiempo por litro	Litros por minuto
Lavadora (capacidad de 42.5 lt por carga)	7 s	8.57 l/m
Fregadero	35 s	1.72 l/m
Regadera	13 s	4.61l/m

Tomando como muestra la cantidad de agua que utiliza la lavadora para una carga, se calcula el caudal en la tubería a partir de la ecuación:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (12)$$

Donde:

Q= caudal

V= volumen del tinaco en litros

t= tiempo en segundos

La Tabla VI muestra el tiempo en que tarda en descender por litro el agua en la tubería, entonces la lavadora por una carga de 42.5 l tarda 297.5 s en llenar una carga por lo tanto se sustituyen estos datos en la ecuación 12.

$$Q = \frac{42.5 \text{ l}}{297.5 \text{ s}}$$

$$Q = 0.1428 \text{ l/s} = 0.001428 \text{ m}^3/\text{s}$$

Utilizando la ecuación 13 y despejando la velocidad, se sustituye el valor del caudal para obtener la velocidad del agua en las tuberías.

$$Q = S \times v \quad (13)$$

Donde:

Q= caudal en  $m^3/s$

S= sección o área de la tubería en  $m^2$

v= velocidad en  $m/s$

Al despejar la velocidad, se tiene:

$$v = \frac{Q}{S} \quad (14)$$

Por lo tanto, sabiendo que una tubería estándar para las casas habitación tiene un diámetro de 19 mm o 0.019 m, se puede obtener el área con la ecuación 15.

$$S = \pi \times r^2 \quad (15)$$

Donde:

S= sección en  $m^2$

r= radio de la tubería, en este caso 0.0095 m.

Sustituyendo los datos se tiene:

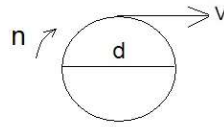
$$S = 3.1416 \times 0.0095^2$$

Por lo tanto, se obtiene una sección de  $283.5294 \times 10^{-6} m^2$ . Se sustituyen los datos de caudal y sección en la ecuación 14.

$$v = \frac{0.001428 m^3/s}{283.5294 \times 10^{-6} m^2}$$

Se concluye que la velocidad en las tuberías de agua que descienden del tinaco es de  $5.03 m/s$ . Por lo tanto, se propone el diseño de una turbina Pelton puesto que son ideales para las aplicaciones con caudales pequeños. De acuerdo a la Fig. 56 se pueden calcular las revoluciones por minuto (R.P.M.) a partir de la velocidad y el diámetro del rotor.





$n = \frac{v \cdot 12}{\pi \cdot d}$	n = r.p.m v = pie/min d = pulgada
$n = \frac{v \cdot 60}{\pi \cdot d}$	n = r.p.m v = m/seg. d = metro
$n = \frac{v}{\pi \cdot d}$	n = r.p.m v = m/min d = metro

Fig. 56. Relación entre la velocidad y las R.P.M. Fuente: [http://jfbingenieria.blogspot.com/2010/11/relacion-entre-la-velocidad-tangencial\\_26.html](http://jfbingenieria.blogspot.com/2010/11/relacion-entre-la-velocidad-tangencial_26.html)

Tomando en cuenta los valores del diámetro de la turbina y la velocidad del agua, se sustituyen en la ecuación para tener un estimado de las R.P.M a las que tendrá que girar el sistema propuesto.

$$n = \frac{v \times 60}{\pi \times d} \quad (16)$$

Donde:

n= ciclos por minuto.  
 v= velocidad en  $m/s$ .  
 d= diámetro en metros.

Sustituyendo los datos correspondientes se obtiene:

$$n = \frac{5.0 \text{ m/s} \times 60}{\pi \times 0.22m}$$

El resultado de la operación indica que el sistema debe girar a 434 R.P.M.

### 3.2 Diseño del banco de pruebas.

Se presenta los diagramas a bloques del banco de pruebas, subdivido en acoplamiento mecánico, control de velocidad y acoplamiento electrónico, estos se presentan a continuación y son descritos respectivamente.

### 3.2.1 Acoplamiento mecánico.

El diagrama a bloques del acoplamiento mecánico para el diseño del banco de pruebas se muestra en la Fig. 57.

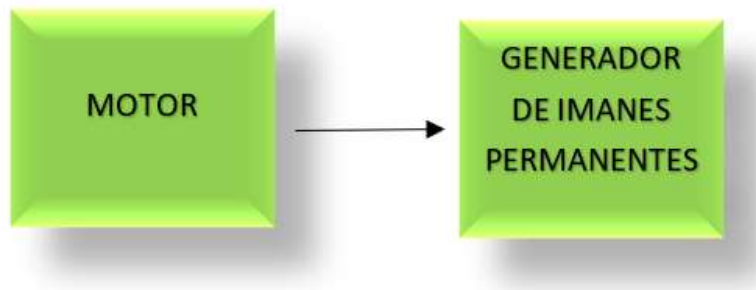


Fig. 57. Diagrama a bloques del acoplamiento mecánico. Fuente propia.

#### 3.2.1.1 Motor

De acuerdo al resultado obtenido de la velocidad del agua en las tuberías se propone el diseño de un sistema mecánico para emular el comportamiento de una turbina instalada en las tuberías de las casas habitación.

Este sistema consta de un motor de 18V acoplado hacia el generador de imanes permanentes a través de una flecha de hierro, así mismo se integran 2 chumaceras para brindar apoyo al eje de rotación del motor.

Por lo tanto, se propone el diseño de una turbina tipo Pelton, que es ideal para caudales pequeños. El diseño se muestra en la Fig. 58 implementado en el software SolidWorks 2018, la cual tiene un diámetro de 22 cm.

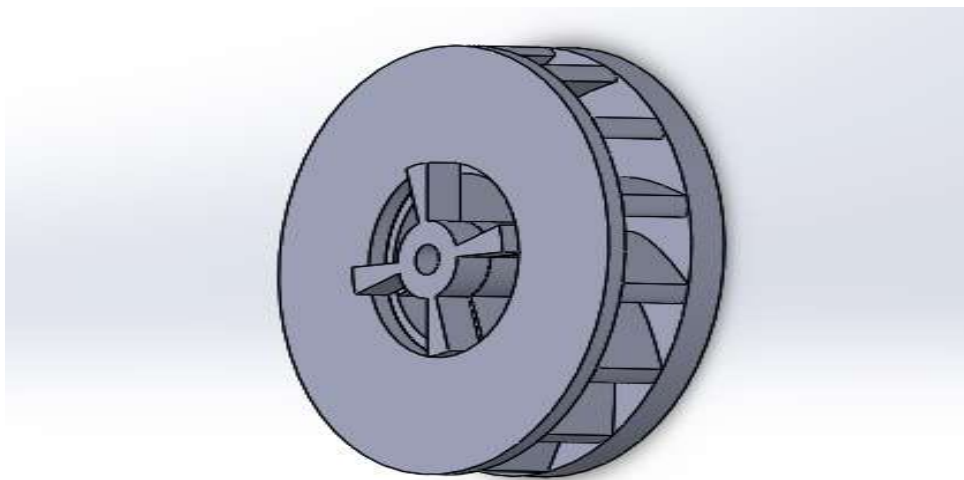


Fig. 58. Diseño de la turbina tipo Pelton en el software SolidWorks 2018. Fuente propia.

En la Fig. 59 se muestra el diseño del sistema mecánico en el software SolidWorks 2018, el cuál sirve como base para la implementación física del banco de pruebas.

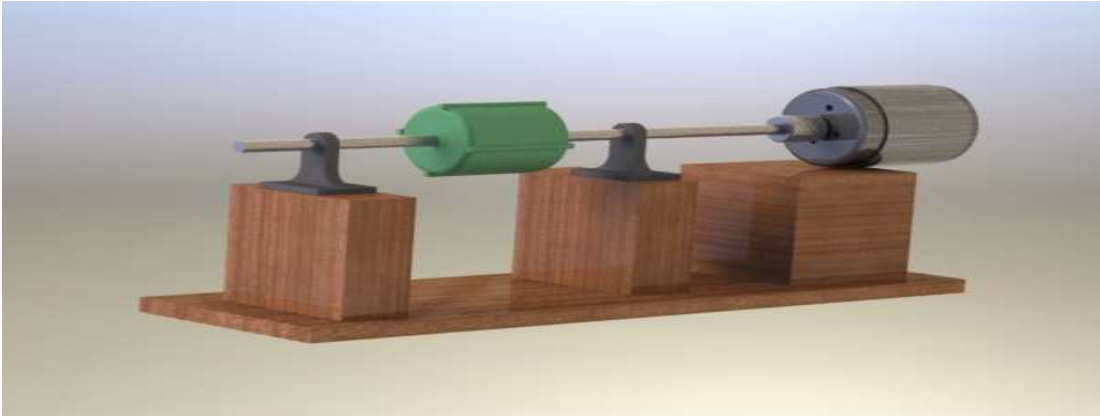


Fig. 59. Diseño del banco de pruebas en el software SolidWorks 2018. Fuente propia.

### 3.2.1.2 Generador de imanes permanentes.

El diseño del generador de imanes permanentes está basado en la Tesis de Maestría “**Análisis de un Generador Radial de Imanes Permanentes y Propuesta de una Metodología para Optimizar la Eficiencia**” por el M. en C Jorge Edmundo Mastache Mastache, en la cual se presenta un generador de 10 polos. [44]

El estator de este generador fue diseñado en el software SolidWorks 2015 el cual se presenta en la Fig. 60.

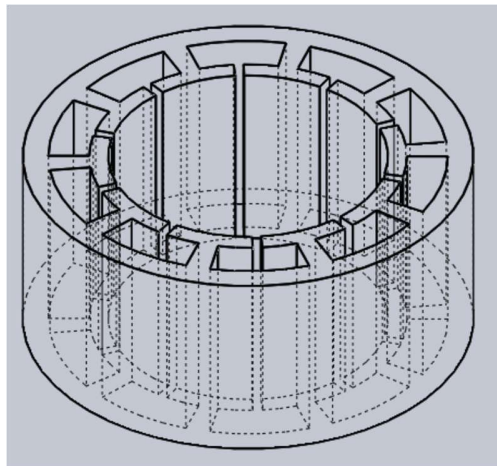


Fig. 60. Estator del generador de imanes permanentes. Fuente: Mastache, J. (2016).

El diseño fue impreso en plástico ABS, el cual fue relleno de resina con polvo de hierro para lograr la inducción en cada uno de los dientes del estator. En la Fig. 61 se muestra la tapa del estator.

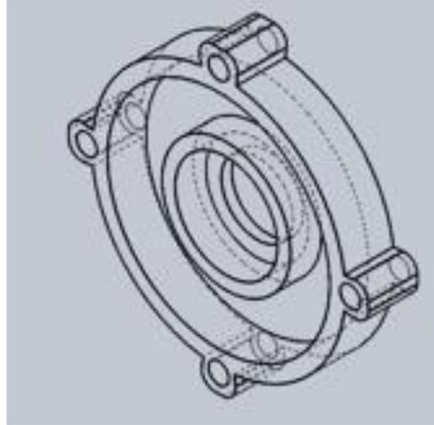


Fig. 61. Tapa del generador de imanes permanentes. Fuente: Mastache, J. (2016).

Así mismo se construyó el rotor de 10 polos en torno de material de acero en el cuál son montados los imanes permanentes de neodimio cuyas medias son 40 mm de largo por 155 mm de ancho por 2 mm de grosor que presentan una densidad de campo magnético remanente de 1.22 Teslas, ambos se presentan en la Fig. 62.



Fig. 62. Imagen del rotor e imanes permanentes del generador. Fuente propia

Los resultados obtenidos del banco de pruebas del generador se pueden observar en la Tabla VII donde se muestra el voltaje máximo que puede generar con y sin carga.

Tabla VII. Resultados de generador de 10 polos. Fuente: Mastache, J. (2016).

Descripción	Símbolo	Valor 10P esperado	Valor 10P físico	Observaciones
Revoluciones por minuto	Rpm	1000	1000	Esta velocidad fue estimada controlando la tensión del motor de CD.
Voltaje máximo sin carga	$V_{maxc}$	28.37	28.52	El valor es muy aproximado a lo estimado considerando la caracterización del material.

Voltaje máximo con carga	$V_{maxc}$	20	19.95	Es la tensión de salida que suministrará nuestro generador a plena carga.
Corriente máxima	$I_{maxp}$	0.350	0.3516	Es la corriente máxima demandada al generador a través de una carga resistiva.
Potencia	$P_e$	3.5	3.507	Es la potencia esperada optimizada para cada generador con la inclusión de pérdidas, resaltando que este generador era el prototipo de prueba.
Número de vueltas por devanado	N	112	112	Número de vueltas de cada devanado.
Eficiencia	$\eta$	0.75	0.72	Este valor a la eficiencia eléctrica estimada para el prototipo de generador de 10 polos.
Porcentaje de Error	$e\%$	-----	-10%	Porcentaje de error de lo real contra lo estimado.

En la Fig. 63 se muestra la captura de pantalla del osciloscopio de la salida de voltaje del generador de 10 polos sin carga, la cual representa la tensión inducida en los devanados producida por los imanes permanentes.

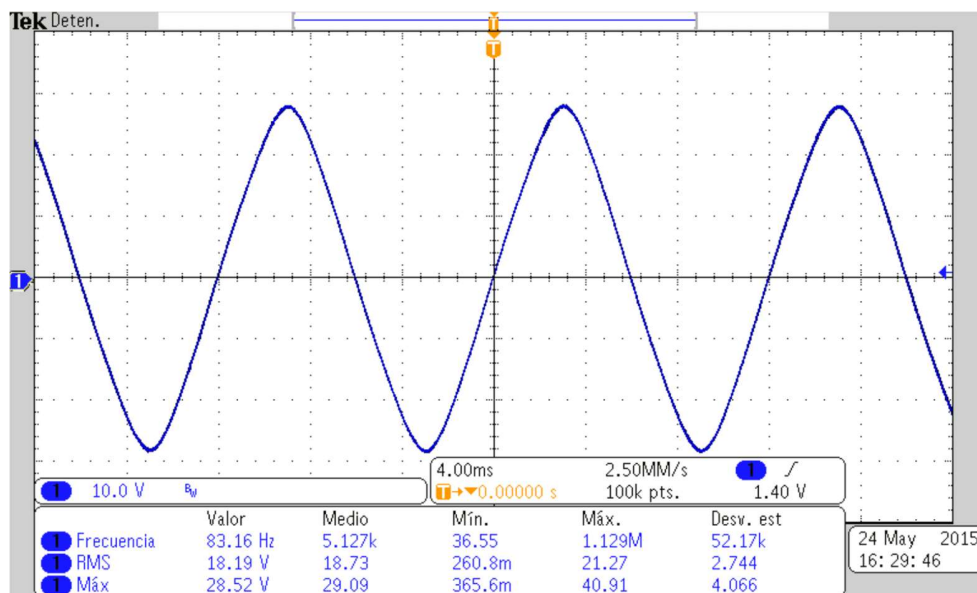


Fig. 63. Voltaje del generador de imanes permanentes. Fuente: Mastache, J. (2016).

Como se puede observar la salida en una señal de corriente alterna, por lo tanto, es necesario adaptar un módulo rectificador con filtro para obtener una corriente continua, el diseño se presenta más adelante.

### 3.2.2 Sistema de control de velocidad para el banco de pruebas.

Para emular la turbina que requiere el sistema se acopla el generador a un motor de CD a 18V y 4.1A cuya velocidad es controlada a través de un circuito electrónico troceador controlado bajo la técnica de modulación PWM, a través de un driver de control de compuerta y un MOSFET semiconductor para el switcheo, emulando así a través de la potencia reflejada a la carga las R.P.M. que genera la turbina con el flujo de agua de una tubería. El diagrama a bloques de este circuito se presenta en la Fig. 64.



Fig. 64. Diagrama a bloques del control de velocidad del motor. Fuente propia.

Dicho PWM permite el control de potencia variable vista en la carga y lo hace conectando de manera controlada durante periodos de tiempo y ciclos de trabajo ajustables.

En la Fig. 65 se muestra la conexión típica del circuito generador PWM, obtenido de la hoja de datos por Texas Instruments, el cual se utiliza como base para realizar la simulación.

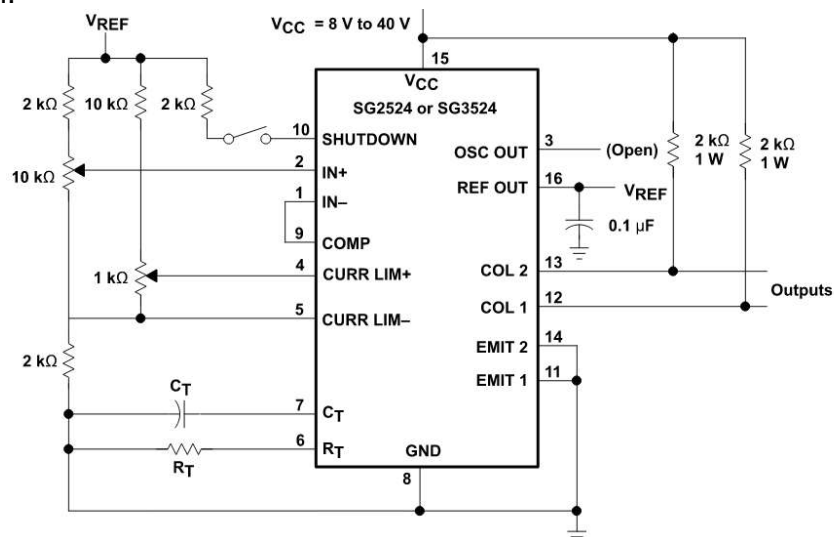


Fig. 65. Conexión típica del circuito generador PWM. Fuente: Texas Instruments.



El diseño del circuito PWM se muestra en la Fig. 66 el cual fue implementado en el software Proteus 8 Professional, en donde se utiliza el circuito integrado UC2525 que es un modulador por ancho de pulso, diseñado para ofrecer un mejor rendimiento y es un equivalente al circuito integrado SG3524.

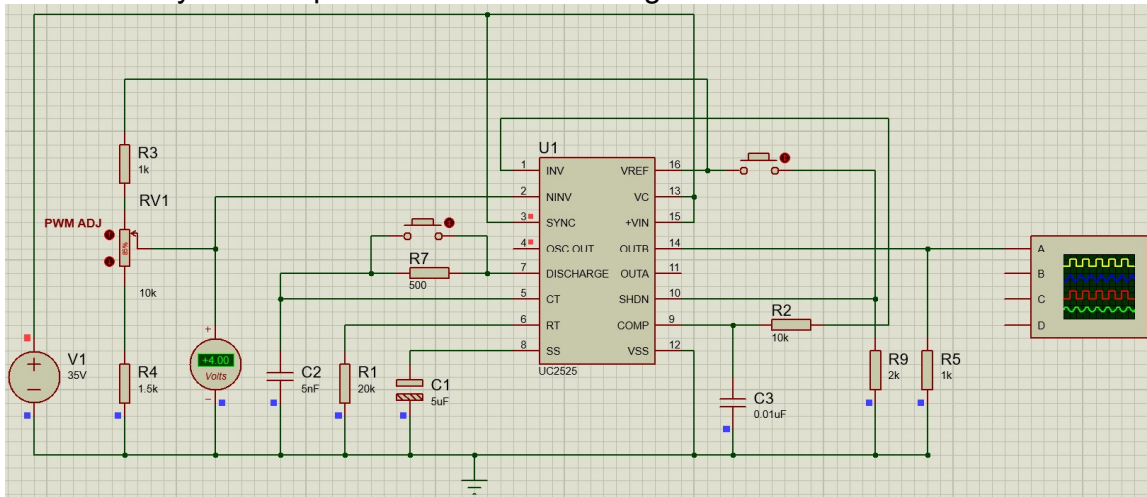


Fig. 66. Circuito PWM en Proteus 8 Professional. Fuente propia.

La señal PWM se logra al comparar a través de un amplificador operacional del integrado la señal generada por la rampa del arreglo RC que define la frecuencia de conmutación a un valor mayor de 20 KHz, junto con una señal de CD proveniente de un valor de referencia que contiene el integrado, como se explica en el marco teórico en la sección 2.4.3.1. El resultado de la simulación se presenta en la Fig. 67.

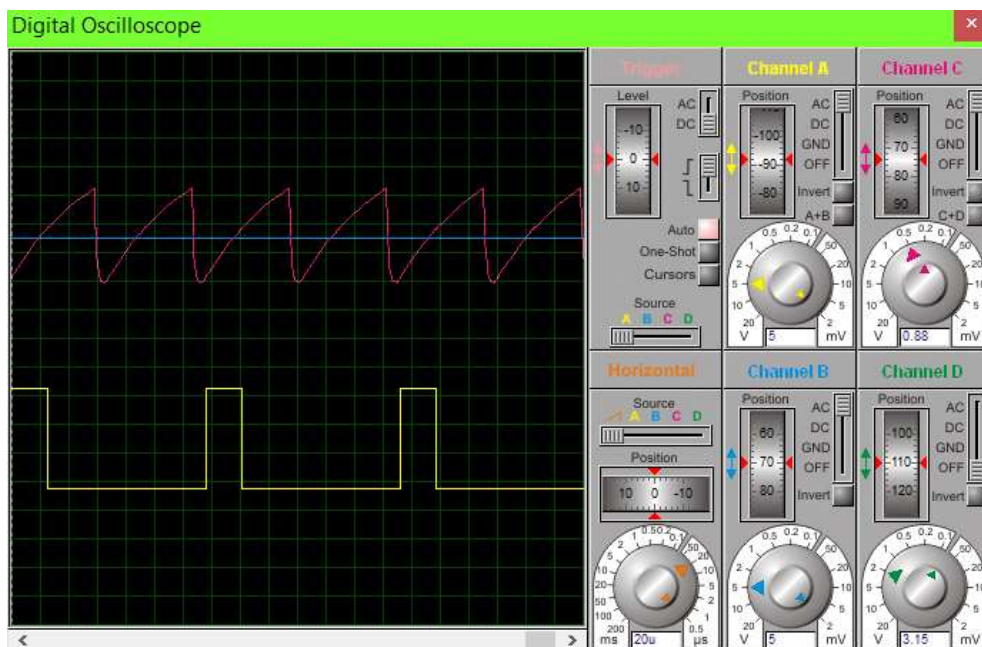


Fig. 67. Resultado de simulación del circuito de control de velocidad. Fuente propia.

Se añade un circuito integrado IR2110 como driver controlador de compuerta a la salida del PWM para controlar la potencia utilizada para el encendido del interruptor de potencia de la conmutación inferior del MOSFET a frecuencias tan altas para sobrepasar el nivel audible del usuario y de esta forma controlar la carga de potencia en nuestra aplicación el motor. Su conexión típica se muestra en la Fig. 68, obtenida de la hoja de datos por Internacional Rectifier.

En este caso se utiliza el MOSFET IRF640 diseñado para la conmutación rápida, universalmente preferible para todas las aplicaciones comerciales e industriales en la disipación de energía a niveles de 50 W por su presentación en encapsulado.

En la Fig. 69 se presenta la simulación en el software Proteus 8 Professional del circuito electrónico controlador del transistor MOSFET, añadiendo a su pin de entrada una señal troceada con una fuente pulsante con las características que presenta la señal de salida del PWM diseñado anteriormente.

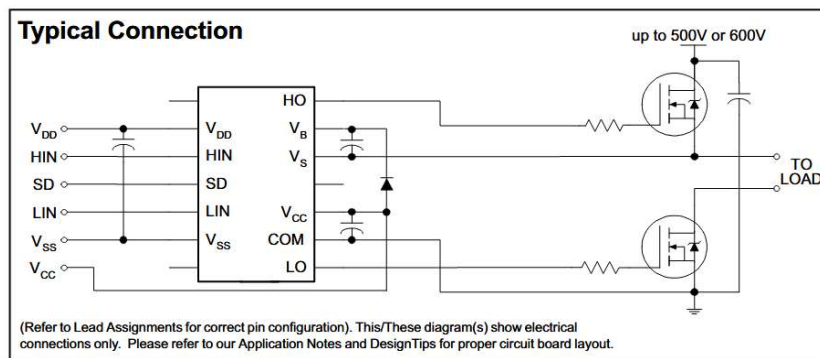


Fig. 68. Conexión típica del circuito IR2110. Fuente: Internacional Rectifier

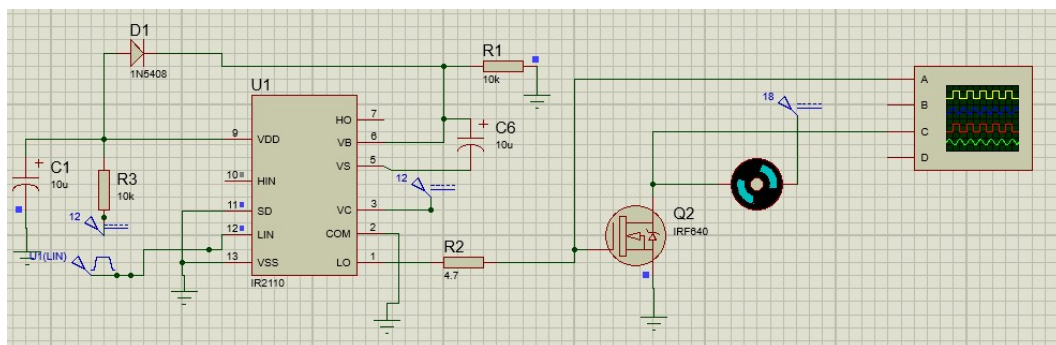


Fig. 69. Diseño del circuito controlador del MOSFET en Proteus 8 Professional. Fuente propia.

La salida de del osciloscopio se muestra en la Fig. 70 donde la línea rosa es la señal de entrada al MOSFET, en este caso una señal PWM de 12V controlada a través de un potenciómetro. La línea amarilla muestra la señal medida de Gate a Drain que posteriormente está conectada a la carga, en este caso el motor.



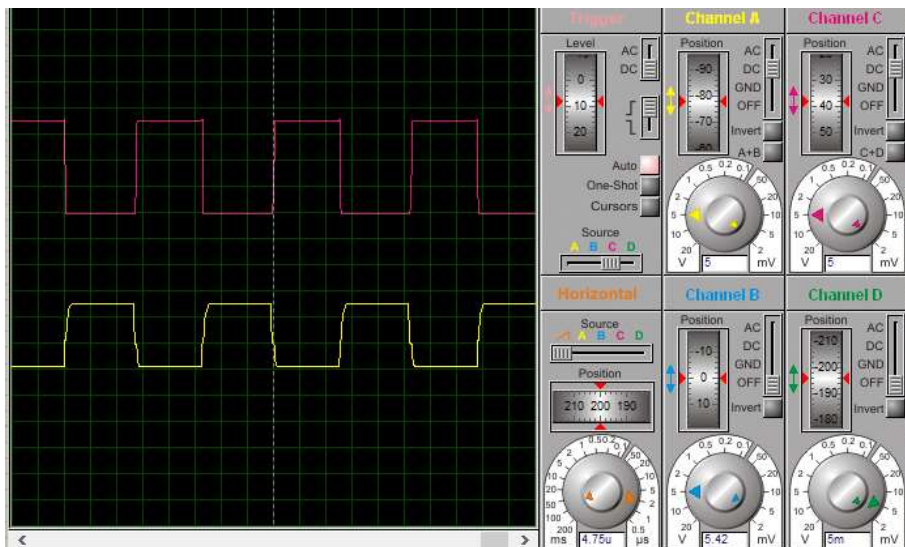


Fig. 70. Resultado de la simulación del circuito activador del MOSFET. Fuente propia.

En la Fig. 71 se muestra el diseño del layout para el circuito de regulación de la velocidad en el Software Proteus Professional 8, que posteriormente se implementó en una placa fenólica y así utilizar la tecnología THT (Tecnología de agujeros pasantes por su traducción del inglés) es un tipo de tecnología que utiliza los agujeros que se practican en las placas de los circuitos impresos para el montaje de los diferentes elementos electrónicos, para crear puentes eléctricos entre una de las caras de la placa de montaje a la otra, mediante un tubo conductor, que por lo general es una aleación de cinc, cobre y plata, para evitar su oxidación y permitir su soldadura.

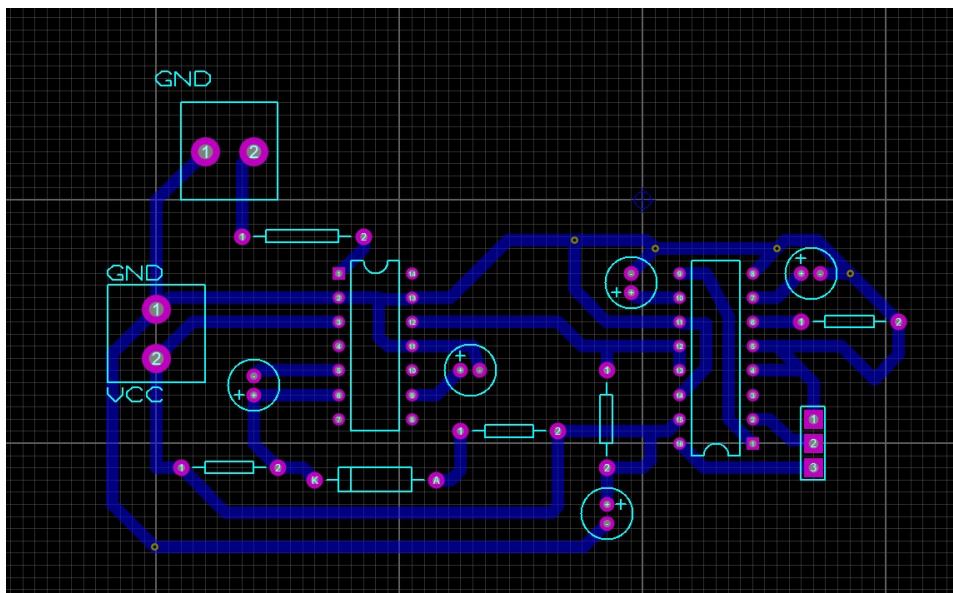


Fig. 71. Diseño de las pistas para impresión del circuito controlador de velocidad. Fuente propia.

En la Fig. 72 se muestra el modelo en 3D del circuito de control de velocidad del motor donde se observan las medidas de cada elemento del circuito.

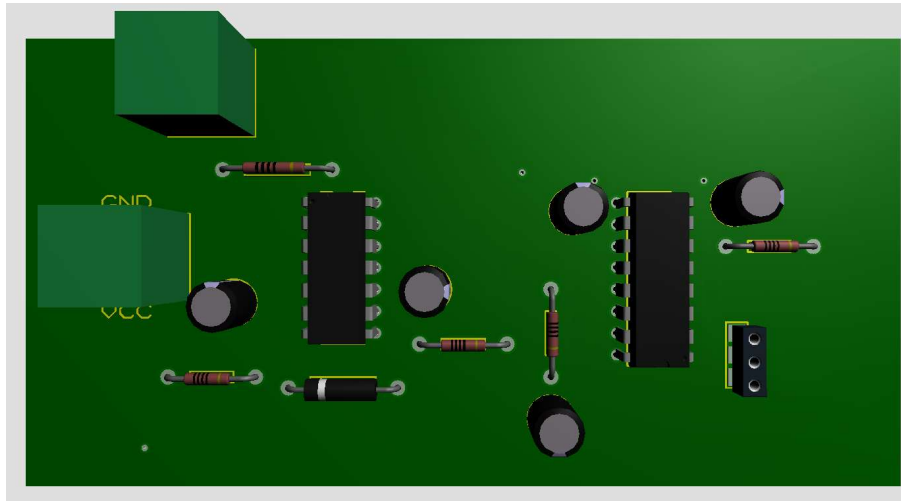


Fig. 72. Modelo 3D del circuito de control de velocidad en Proteus Professional 8. Fuente propia.

Adicionalmente se conecta en antiparalelo un diodo para eliminar el efecto inductivo en una carga como la de un motor, esto es que si existen voltajes negativos con una carga inductiva el diodo entra en conducción liberando este voltaje que puede dañar la circuitería o algunos componentes electrónicos. El esquema de conexión se muestra en la Fig. 73.

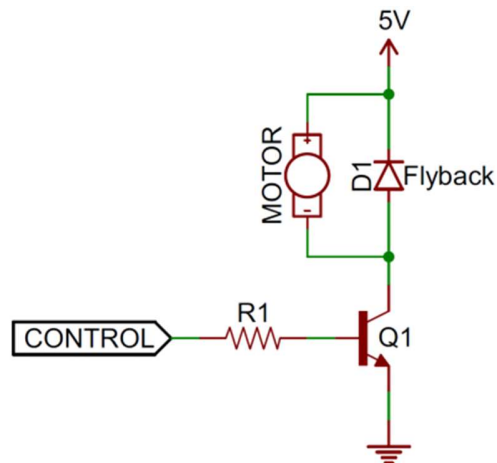


Fig. 73. Conexión de diodo en antiparalelo a la carga. Fuente: <https://forum.arduino.cc/index.php?topic=333954.0>

### 3.2.3 Circuito de recuperación de energía.

El diagrama a bloques del diseño de la etapa de recuperación de energía del sistema se presenta en la Fig. 74.

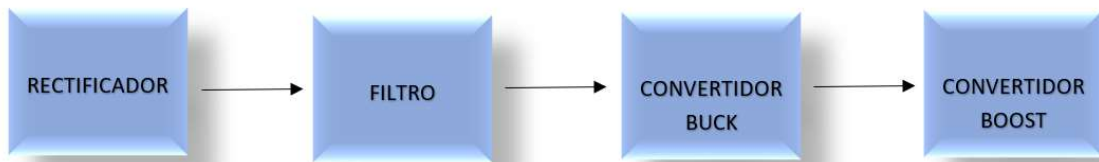


Fig. 74. Diagrama de bloques del circuito de recuperación de energía. Fuente propia.

En la Fig. 75 se muestran las etapas del circuito de recuperación de energía, simulación diseñada en el software PSIM 9.0. Cada etapa es descrita y diseñada a continuación.

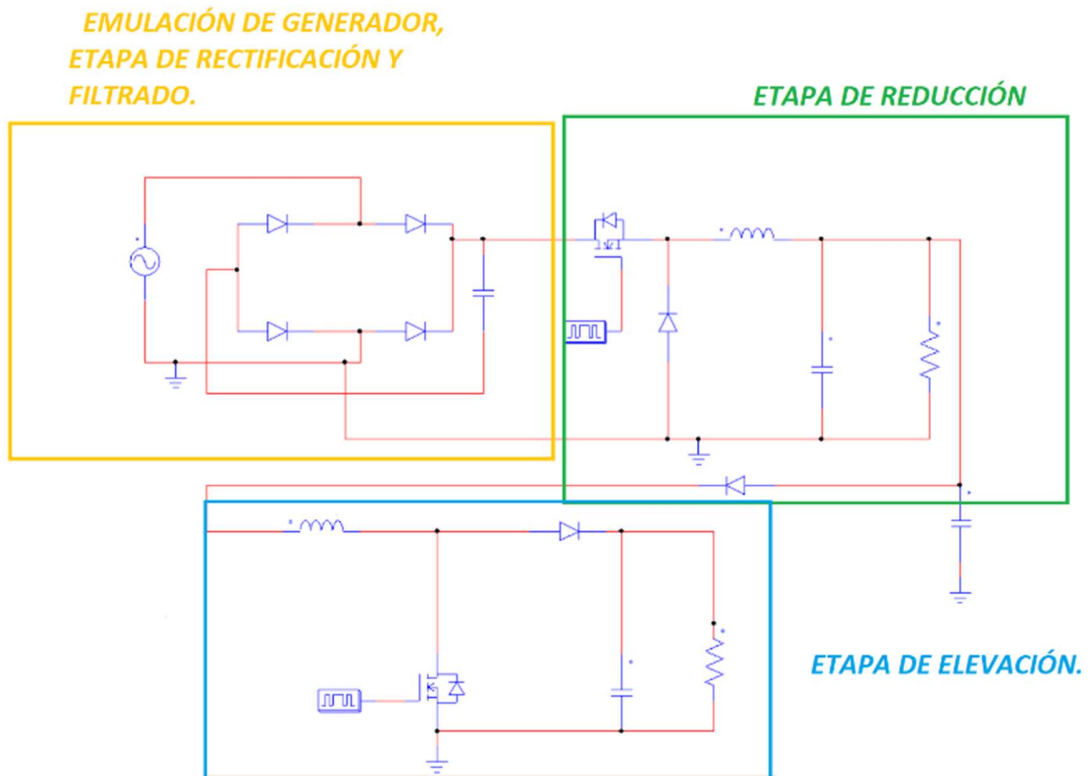


Fig. 75. Etapas del circuito de recuperación de energía diseñado en el software PSIM. Fuente propia.

### 3.2.3.1 Emulación de generador y etapa de rectificación y filtrado.

La señal a la salida del generador de imanes permanentes es simulada a través de una fuente de CA, esta señal es dirigida a un módulo rectificador de onda completa conformado por 4 diodos de germanio que poseen la característica de tener una caída de voltaje de 0.3V a diferencia de los de silicio que tienen una caída de voltaje de 0.7V, este circuito se muestra en la Fig. 76 y tiene la finalidad de obtener una señal rectificada hacia los ciclos positivos de la señal.

### EMULACIÓN DE GENERADOR, ETAPA DE RECTIFICACIÓN Y FILTRADO.

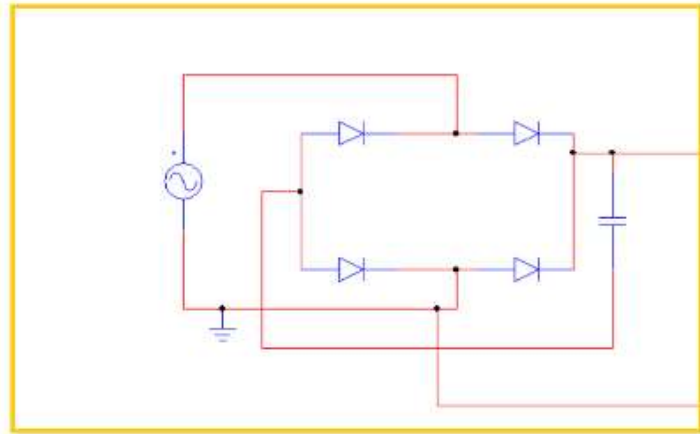


Fig. 76. Simulación del generador de imanes permanentes, etapa de rectificación y filtrado en PSIM. Fuente propia.

#### 3.2.3.2 Etapa de reducción.

Para estabilizar la señal de salida de la etapa de rectificación y filtrado se propone el diseño de una etapa de reducción a través de un convertidor Buck que se muestra en Fig. 77 porque este tipo de convertidor puede trabajar con cargas variables, además de tener una alta eficiencia y contar con autorregulación.

### ETAPA DE REDUCCIÓN

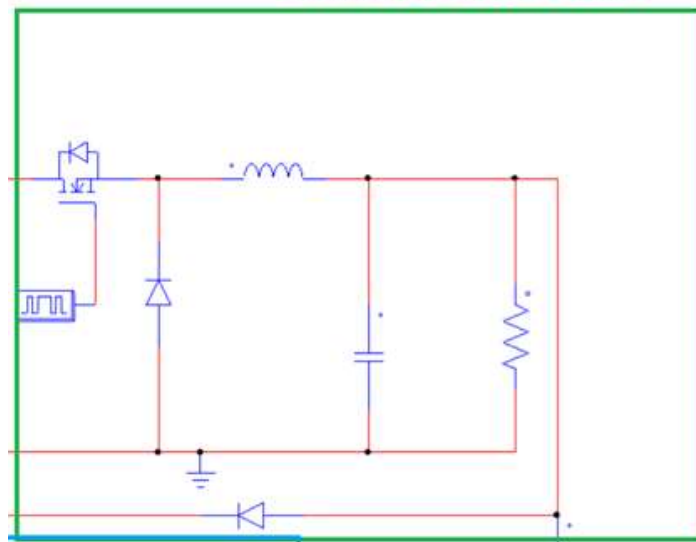


Fig. 77. Circuito de la etapa de reducción en PSIM. Fuente propia.

Este convertidor CD-CD será diseñado a partir del circuito integrado AD8406 por ETC, cuyas características son:

- Frecuencia de trabajo de 120KHz.
- Rango de voltaje de salida de 5V.
- Corriente de suministro con un valor típico de 5mA.
- VCD = 12V, IO = 700mA

La conexión típica de este integrado se muestra en la Fig. 78.

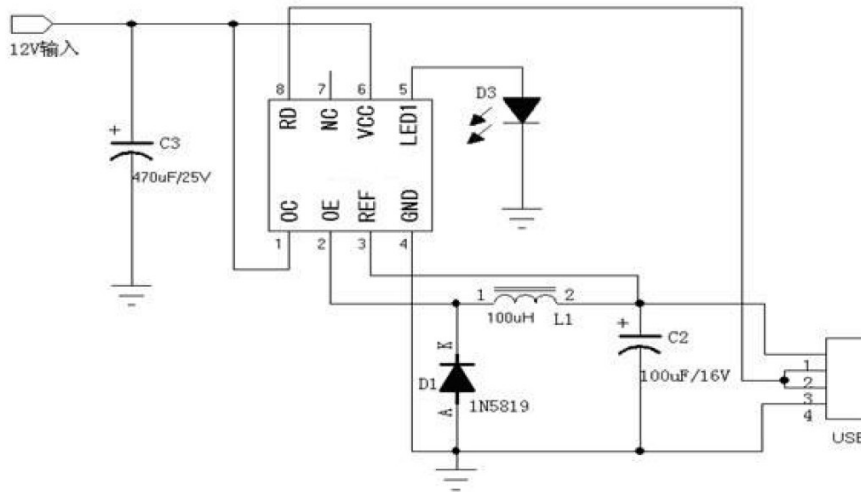


Fig. 78. Conexión típica del circuito integrado AD8406. Fuente: ETC.

El análisis de los valores para los componentes de este convertidor a partir de las condiciones de diseño del integrado se presenta a continuación.

A partir de la ecuación 17 se puede definir el ciclo de trabajo a la frecuencia de conmutación del integrado.

$$\delta = \frac{V_o}{V_i} \quad (17)$$

Donde:

$\delta$  = Ciclo de trabajo.

$V_o$  = Voltaje de salida.

$V_i$  = Voltaje de entrada.

Al definir  $V_o = 5V$  y  $V_i = 9V$  se obtiene un ciclo de trabajo de  $\delta=0.5$ . Con este valor se pueden definir de los valores de los componentes que deben ser conectados al circuito integrado.

$$L = \frac{(V_i - V_{QON} - V_o)}{f_{PWM} \times 2I_o} \delta \quad (18)$$

Donde:

$L$  = Valor de la bobina.

$V_i$  = Voltaje de entrada.

$V_o$  = Voltaje de salida.

$I_o$  = Corriente de salida.

$\delta$  = Ciclo de Trabajo.

$f_{PWM}$  = Frecuencia de entrada del MOSFET.

$V_{QON}$  = Voltaje en el estado de encendido del MOSFET

Con una corriente nominal de 700mA, una frecuencia de 120 KHz y un voltaje en el estado de encendido del MOSFET idealmente de 0V, se sustituyen estos datos en la ecuación 18.

$$L = \frac{(9 - 0 - 5)}{120000 \times 2(0.7)} 0.5$$

De este modo, se obtiene un valor de la bobina de  $L=11.9\mu H$ .

También se calcula el valor del capacitor con la ecuación 19.

$$C = \frac{I_i}{4(f_{PWM} \times V_{pp})} \quad (19)$$

Donde:

$C$  = Valor del capacitor.

$I_i$  = Corriente de suministro.

$f_{PWM}$  = Frecuencia de entrada del MOSFET.

$V_{pp}$  = Voltaje de rizo de salida.

Con una corriente de suministro de 5mA, una frecuencia de entrada del MOSFET de 120KHz y un voltaje de rizo de salida de  $1\mu V$ , se sustituyen estos datos en la ecuación 19.

$$C = \frac{0.005}{4(120000 \times 0.000001)}$$

Se obtiene un valor del capacitor de  $C=104\mu F$ .

De acuerdo a la Ley de Ohm es posible calcular el valor de la resistencia del circuito a partir de la ecuación 20.

$$V = I \times R \quad (20)$$

Donde:

$V$  = Voltaje.

$I$  = Corriente.

$R$  = Resistencia.

Despejando el valor de la resistencia se obtiene la ecuación 21.

$$R = \frac{V}{I} \quad (21)$$

Se sustituye el voltaje de salida de 5V y la corriente a 700mA en la ecuación 21.

$$R = \frac{5V}{0.7A}$$

El resultado de la resistencia de carga es de  $R=7.14 \Omega$ . Estos valores sirven como base para hacer la simulación del circuito.

A continuación, se muestra el resultado de la simulación en PSIM 9.0, en donde se mide el voltaje mostrado con una línea azul y la corriente con una línea roja de cada uno de los elementos del circuito, estas señales son comparadas con la Fig. 44, donde se muestra la evolución de tensiones y corrientes con el tiempo del convertidor.

En Fig. 79 se puede observar el voltaje y corriente medido en el MOSFET, el cual en la Fig. 44 se representa por  $i_B$ .

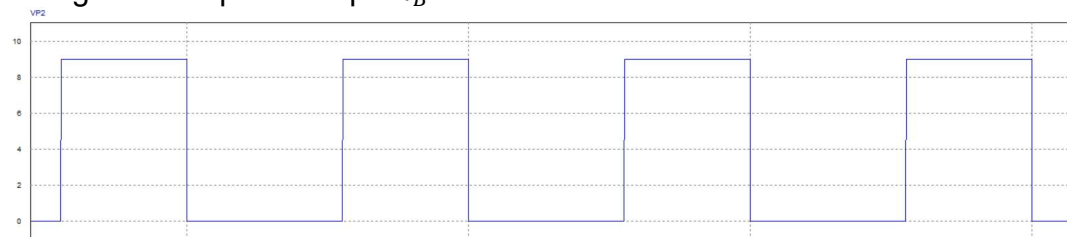


Fig. 79. Señales de voltaje y corriente en la simulación del convertidor Buck a través del MOSFET.

El voltaje y la corriente en el diodo se muestra en Fig. 80, que al ser comparada con la figura 44 se observa que cuentan con el mismo comportamiento

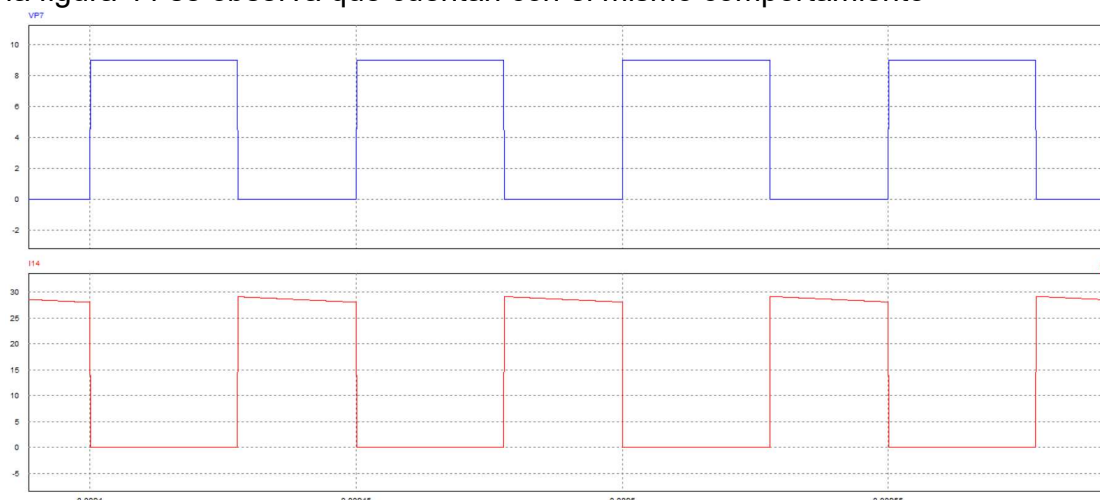


Fig. 80. Señales de voltaje y corriente en la simulación del convertidor Buck a través del diodo.

Igualmente se mide el voltaje y corriente de la bobina, que a continuación se muestra en Fig. 81 donde se puede observar que tiene la misma forma de onda comparada con la Fig. 44.

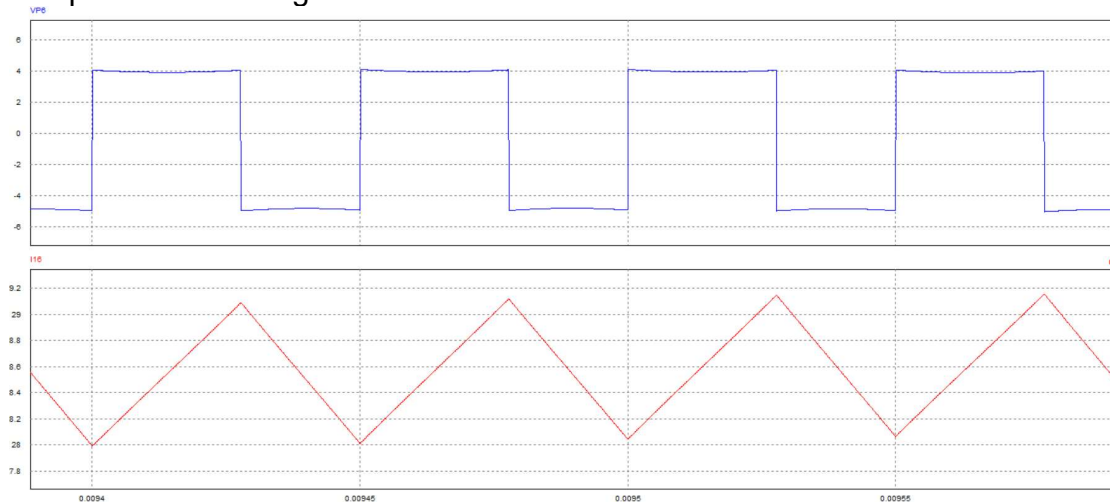


Fig. 81. Señales de voltaje y corriente en la simulación del convertidor Buck a través del inductor.

En la Fig. 82 se muestra la conexión del circuito rectificador y del convertidor Buck para su implementación placa fenólica, los cuales fueron la base para este proyecto debido a que el convertidor Buck regulariza y estandariza a una tensión de 5 V la transformación de energía proveniente del generador de imanes permanentes, este conjunto de circuitos de potencia fue diseñado en el software Altium Designer Release 10.

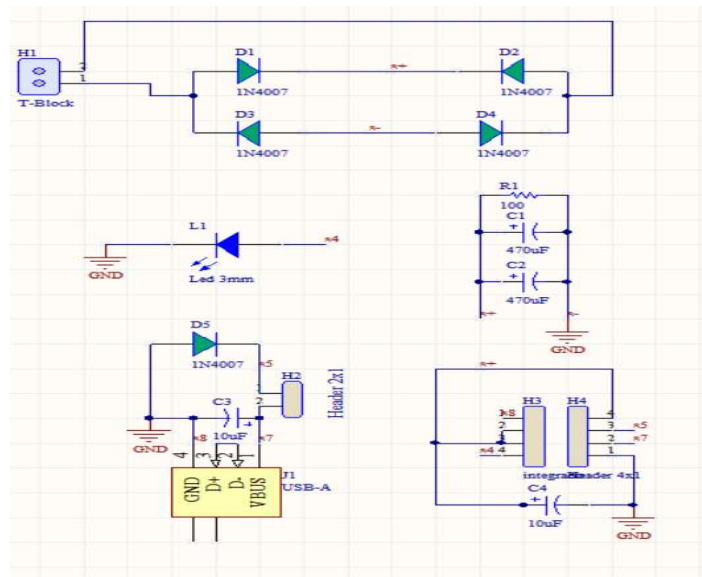


Fig. 82. Diseño del circuito rectificador con filtro y el convertidor Buck implementado en el software Altium Designer. Fuente propia.

Para la implementación en placa fenólica del circuito, es necesario el diseño del layout para la impresión de las pistas, por lo que pueden ser diseñadas a partir de



la conexión mostrada en la Fig. 82, las cuales fueron diseñadas en el mismo software y posteriormente impresas en hoja tipo transfer a láser para ser trasladadas a la placa. El diseño de las pistas se muestra en la Fig. 83.

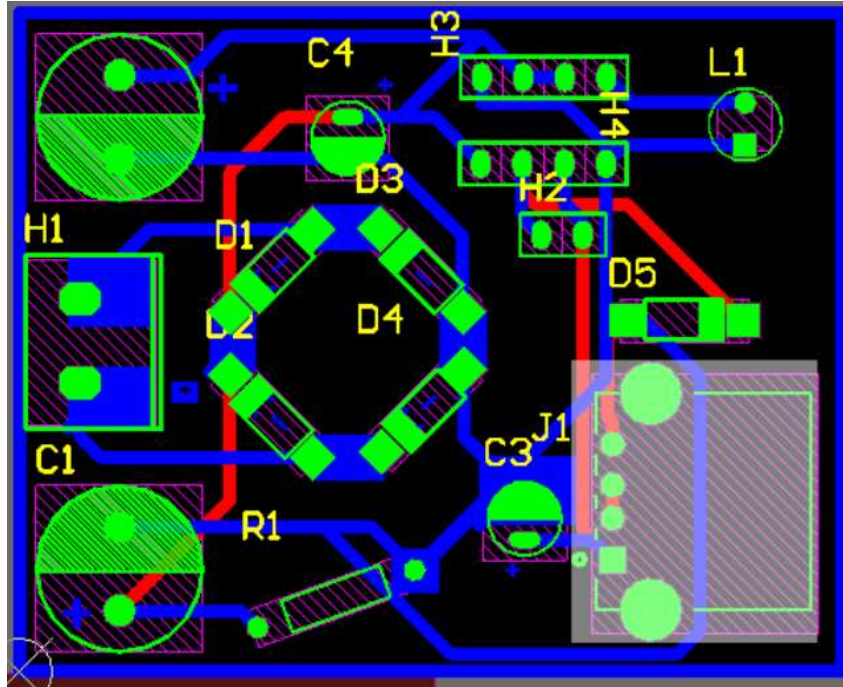


Fig. 83. Diseño de las pistas para su implementación en placa fenólica en Altium Designer. Fuente propia.

En la Fig. 84 se muestra el modelo en 3D de la etapa de rectificación y filtrado, así como el convertidor Buck donde se muestra el dimensionamiento de los elementos de potencia y su salida USB para múltiples aplicaciones.

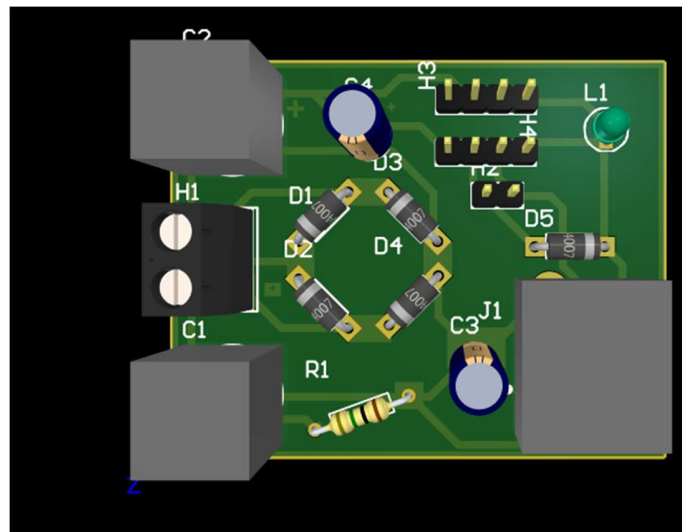


Fig. 84. Modelo 3D del circuito rectificador con filtro y el convertidor Buck. Fuente propia.

### 3.2.3.3 Etapa de elevación.

Para la aplicación de sistema de recuperación de energía, es necesario elevar el voltaje de salida del convertidor Buck, por lo tanto esta etapa de elevación se diseña a partir de un convertidor Boost y su circuito se muestra en la Fig. 85.

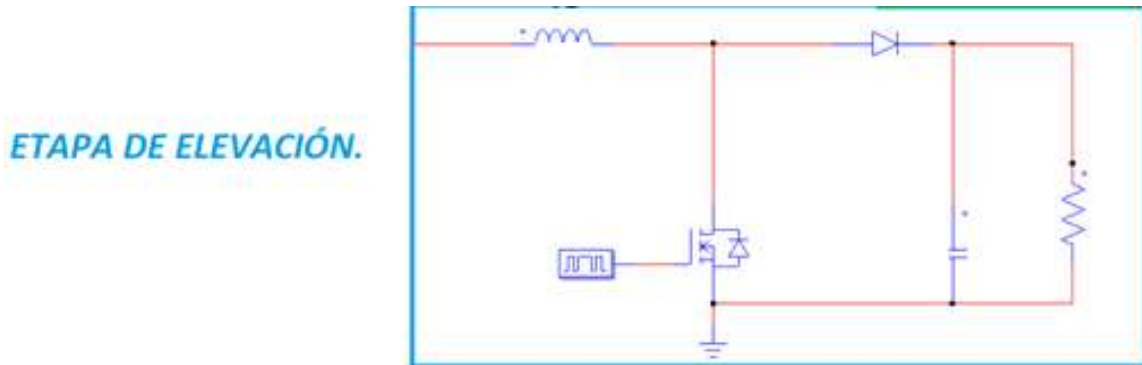


Fig. 85. Circuito de la etapa de elevación en PSIM. Fuente propia.

Este convertidor se diseña a partir del circuito integrado MT3608 por AEROSEMI. La conexión típica de este circuito se presenta en la Fig. 86.

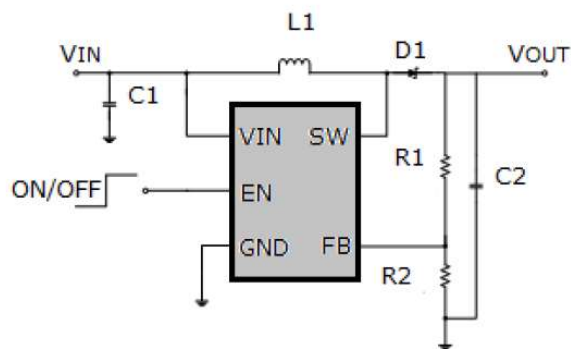


Fig. 86. Conexión típica del circuito integrado MT3608. Fuente: AEROSEMI.

Las características de este circuito integrado son:

- Frecuencia de trabajo de 1.2MHz.
- Rango de voltaje de salida de hasta 28V
- Modo de modulación automática de frecuencia de pulso.
- Voltaje de salida ajustable

El análisis de este convertidor se presenta a continuación.

A partir de la ecuación:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 - \delta} \quad (32)$$

Se puede determinar el ciclo de trabajo realizando el despeje necesario, obteniendo la ecuación:

$$\delta = 1 - \frac{5V}{12V} \quad (23)$$

Por lo tanto, se obtiene un ciclo de trabajo de  $D=0.6$ . Con este valor es posible obtener el valor de la bobina para el funcionamiento del convertidor a partir de la ecuación 24.

$$L = \frac{\delta \times R \times (1 - \delta)^2}{2f_{PWM}} \quad (24)$$

Donde:

$L$ = Valor de la bobina.

$\delta$ = Ciclo de trabajo.

$R$ = Valor de la resistencia.

$f_{PWM}$ = Frecuencia de entrada del MOSFET.

Como se observa en la Fig. 75 la señal de salida del convertidor Buck es la señal de entrada del convertidor Boost, por lo tanto tenemos una corriente de entrada de 700mA y un voltaje de 5V.

A partir de la ecuación 25 es posible calcular la potencia de entrada del convertidor Boost.

$$P_{in} = V_{in} \times I_{in} \quad (25)$$

Donde:

$P_{in}$ = Potencia de entrada.

$V_{in}$ = Voltaje de entrada.

$I_{in}$ = Corriente de entrada.

Se sustituyen en la ecuación 25 los valores antes mencionados.

$$P_{in} = 5v \times 0.7A$$

Por lo que la potencia de entrada es de  $P_{in}=3.5$  W. Teniendo en cuenta que la potencia de entrada es igual a la potencia de salida ( $P_{in} = P_o$ ), se obtiene la corriente de salida a partir del despeje de la ecuación 25, resultando así:

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} \quad (26)$$

Sustituyendo un voltaje de salida de 12V y la potencia de salida de 3.5 W en la ecuación 26 tenemos:

$$I_o = \frac{3.5 \text{ W}}{12 \text{ V}}$$

El resultado es de una corriente igual a  $I_o=0.291$  A. Este valor se sustituye en la ecuación 21 elevado al doble para garantizar su funcionamiento con múltiples cargas.

$$R = \frac{12 \text{ V}}{0.582 \text{ A}}$$

Se obtiene una resistencia de  $R=20.61\Omega$ , ese valor se puede sustituir en la ecuación 24 para obtener el valor de la bobina, así como un ciclo de trabajo de  $\delta=0.6$  y una frecuencia PWM de 120KHz.

$$L = \frac{0.6 \times 20.61 \times (1 - 0.6)^2}{2(120000)}$$

Para este convertidor el valor de la bobina es de  $L=8\mu\text{H}$ . De igual forma, se calcula el valor del capacitor a partir de la ecuación 27.

$$C = \frac{i_o \times \delta \times T}{V_{pp}} \quad (27)$$

Donde:

$i_o$  = Corriente de salida.

$\delta$  = Ciclo de trabajo.

T = Periodo.

$V_{pp}$  = Voltaje de rizo de salida.

El periodo T se puede definir a partir con la ecuación 28.

$$T = \frac{1}{f} \quad (28)$$

Al sustituir una frecuencia de 120KHz en la ecuación anterior se tiene:

$$T = \frac{1}{120000}$$

Obtenemos un periodo de  $T=83\mu\text{s}$ , por lo que se puede sustituir en la ecuación 27, así como una corriente de  $i=0.582\text{A}$ , el ciclo de trabajo de 0.6 y un voltaje de rizo de salida de 10mV.

$$C = \frac{0.582 \times 0.6 \times 0.0000083}{0.010}$$

Se obtiene finalmente el valor del capacitor de  $C=289\mu\text{F}$ . Los resultados de los valores sirven como base para definir los valores en la simulación e implementación de circuito.

En Fig. 87 se muestra el voltaje en el MOSFET de drenaje a fuente, representado por la línea azul y la corriente representada con la línea roja. Estas señales se puede comparar con la Fig. 45 donde el MOSFET es representado por Q y muestra sus estados en encendido y apagado.

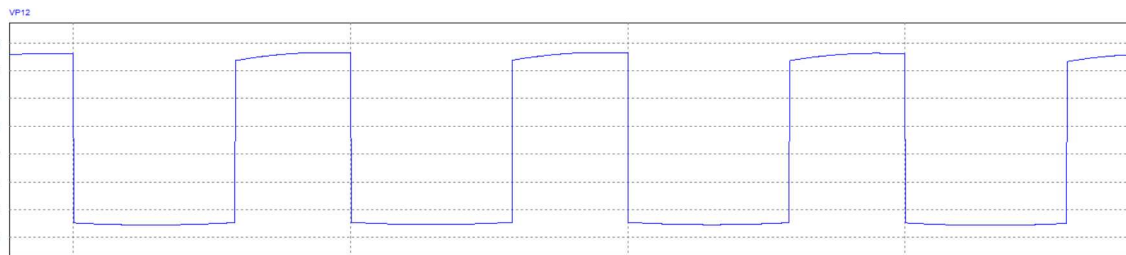


Fig. 87. Señal de voltaje en la simulación del convertidor Boost a través del MOSFET. Fuente propia.

El diodo en la Fig. 45 es representada por D, y en la siguiente se puede observar el voltaje representado por una línea azul y la corriente por una línea roja, las cuales muestran el comportamiento típico a través del interruptor natural del convertidor el modo de operación en conducción continua.

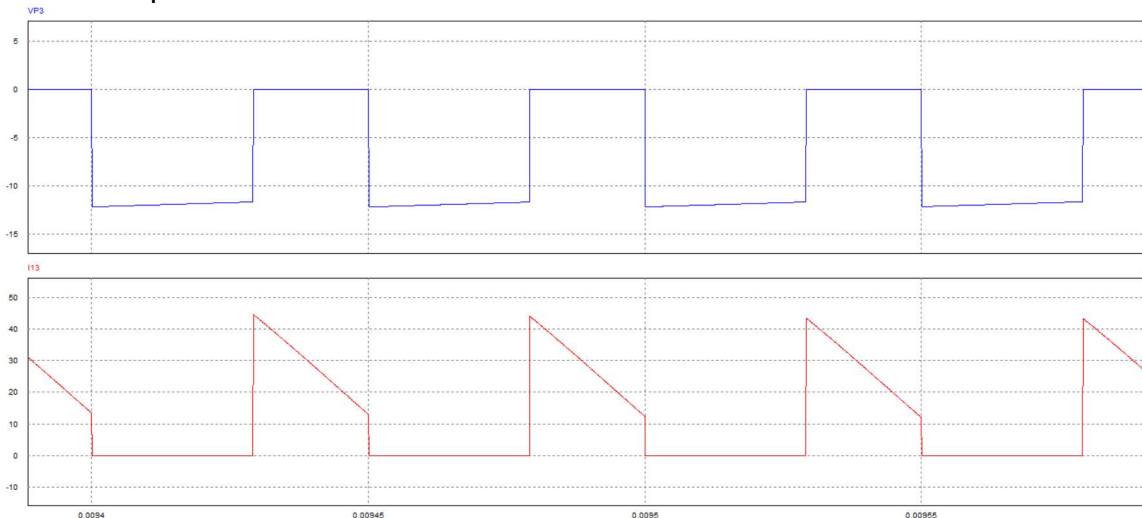
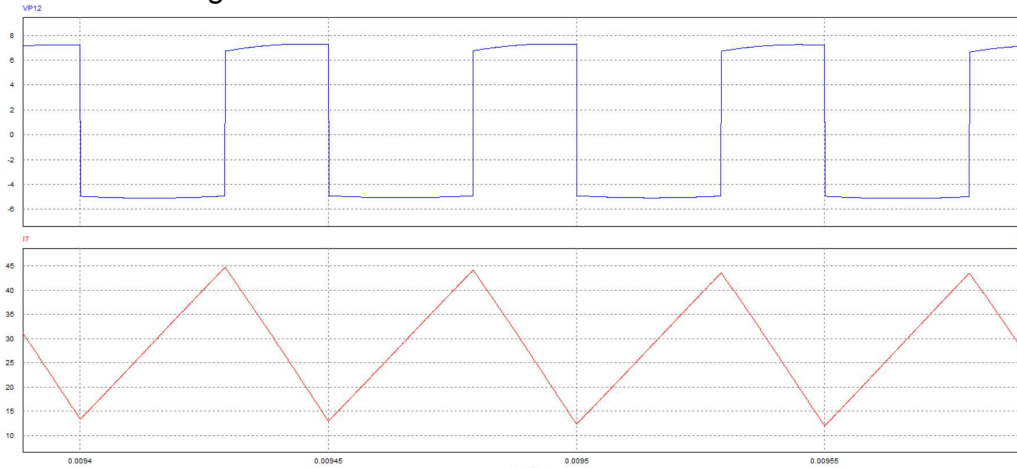


Fig. 88. Señales de voltaje y corriente en la simulación del convertidor Boost a través del diodo. Fuente propia.

El voltaje y la corriente en la bobina se muestra en la siguiente Fig.89, cuyas formas pueden ser comparadas con las formas de onda de la Fig. 45, cabe señalarse que la corriente en la bobina del convertidor refleja la suma de los dos estados de

conmutación del convertidor, en el cual parte de la corriente que pasa por la bobina en el estado del encendido es sustentada por el MOSFET y en el tiempo de apagado el diodo funge la función de conducir la corriente de entrada para ser transmitido a la carga.



*Fig. 89. Señales de voltaje y corriente en la simulación del convertidor Boost a través del inductor. Fuente propia.*

# 4. RESULTADOS.

En este capítulo se presenta el banco de pruebas implementado físicamente, así como los circuitos de control de velocidad del motor y el circuito de recuperación de energía mostrando los resultados en el osciloscopio.

## 4.1 Acoplamiento mecánico.

En la Fig. 90 se muestra el armado físico del sistema mecánico del banco de pruebas constituido por motor regulado conectado al generador de imanes permanentes a través de una flecha de hierro como acople mecánico para emular el comportamiento de la turbina. La base anteriormente diseñada, está construida de madera para brindar mayor estabilidad por la vibración del movimiento del motor.



*Fig. 90. Implementación del acoplamiento mecánico. Fuente propia.*

A partir de la construcción del acoplamiento se realizaron las pruebas de generación de energía y mediciones cuyos resultados se muestran a continuación.

## 4.2 Acoplamiento electrónico.

El acoplamiento electrónico consiste en los circuitos del control de velocidad del motor y el circuito de recuperación de energía, estos circuitos fueron montados en una base de madera para poder manipularlos más fácilmente y brindarles mayor soporte, la base se puede observar en la Fig. 91.



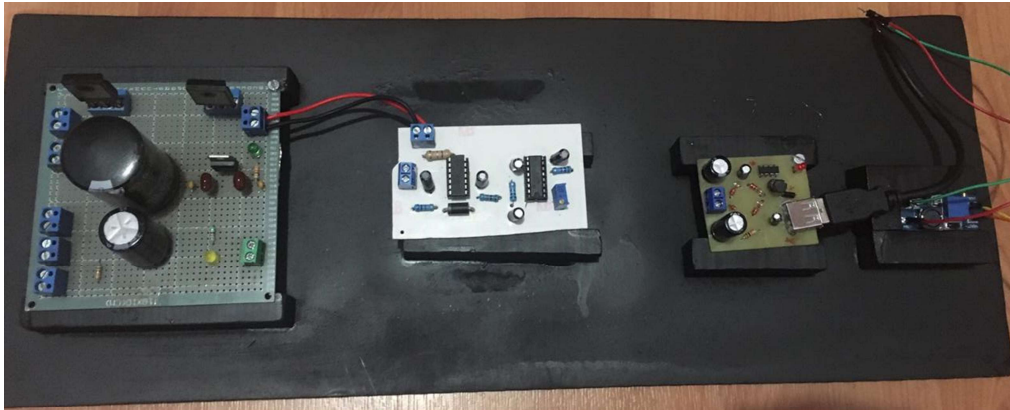


Fig. 91. Acoplamiento electrónico. Fuente propia.

#### 4.2.1 Control de velocidad del motor.

En la Fig. 92 se muestra el circuito físico implementado en una placa fenólica con tecnología THT, cuyas pistas fueron diseñadas anteriormente.



Fig. 92. Circuito de control de velocidad implementado con tecnología THT. Fuente propia.

El siguiente circuito muestra la implementación de la etapa de troceador con MOSFET, así como el diodo de libre rodada en una placa fenólica perforada cuya entrada es la señal PWM. Este circuito se muestra en la Fig. 93.

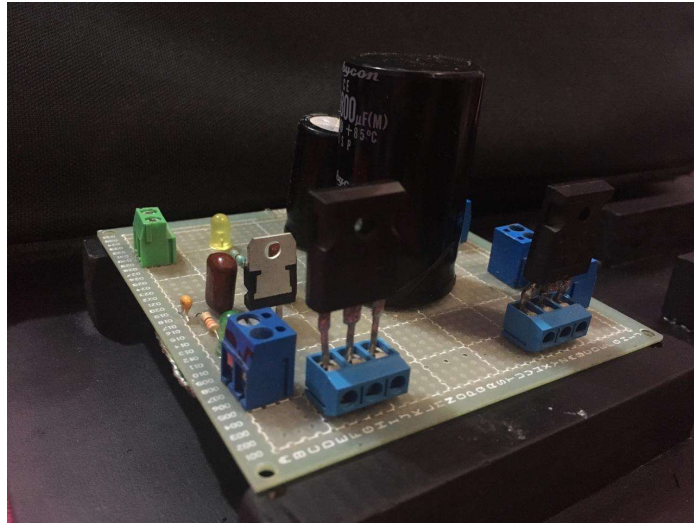


Fig. 93. Conexión del MOSFET y diodo de libre rodada. Fuente propia.

La Fig. 94 muestra la captura de pantalla del osciloscopio Tektronik TBS-1202B-EDU de la señal de salida del control de velocidad. Esta señal tiene una amplitud de 12V y una frecuencia de 58.87Hz como se puede observar en la imagen.

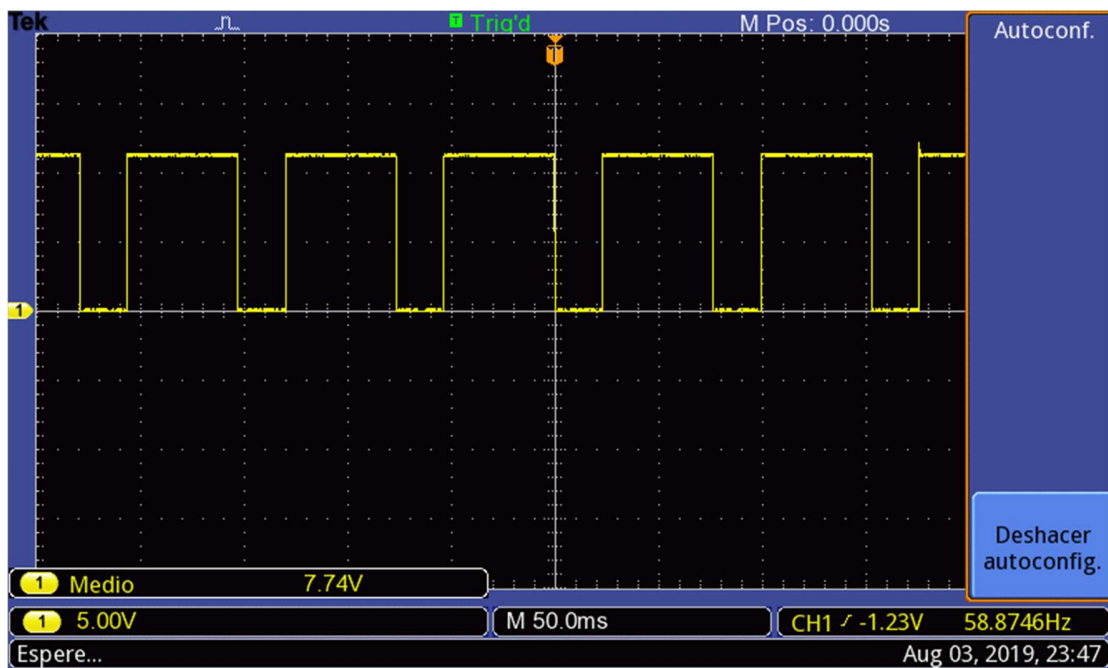


Fig. 94. Señal de salida del circuito de control de velocidad. Fuente propia.

En la Fig. 95 se muestra la salida del generador de imanes permanentes con el motor controlado a 434 r.p.m., las cuales se pudieron ajustar a partir del circuito para el control de velocidad obteniendo un voltaje pico de 10.9V.

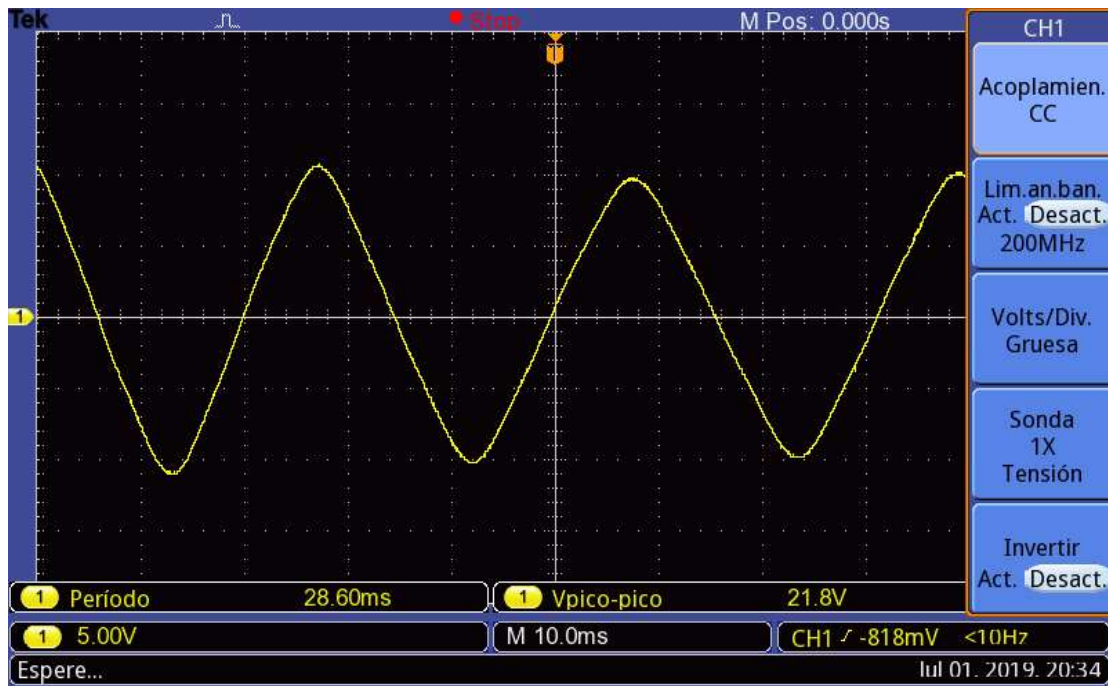


Fig. 95. Salida del generador de imanes permanentes a 434 R.P.M. Fuente propia.

#### 4.2.2 Circuito rectificador y convertidor Buck.

En la Fig. 96 se muestra el circuito rectificador con filtro, así como el convertidor Buck implementados en una placa fenólica con la misma tecnología utilizada anteriormente.



Fig. 96. Circuito rectificador y convertidor Buck en placa fenólica. Fuente propia.

Se tomó la captura de pantalla del osciloscopio en la salida del circuito rectificador de diodos, cuya señal muestra una salida unipolar en CD con un voltaje pico-pico de 9.8V. Esta señal se puede observar en la Fig. 97.

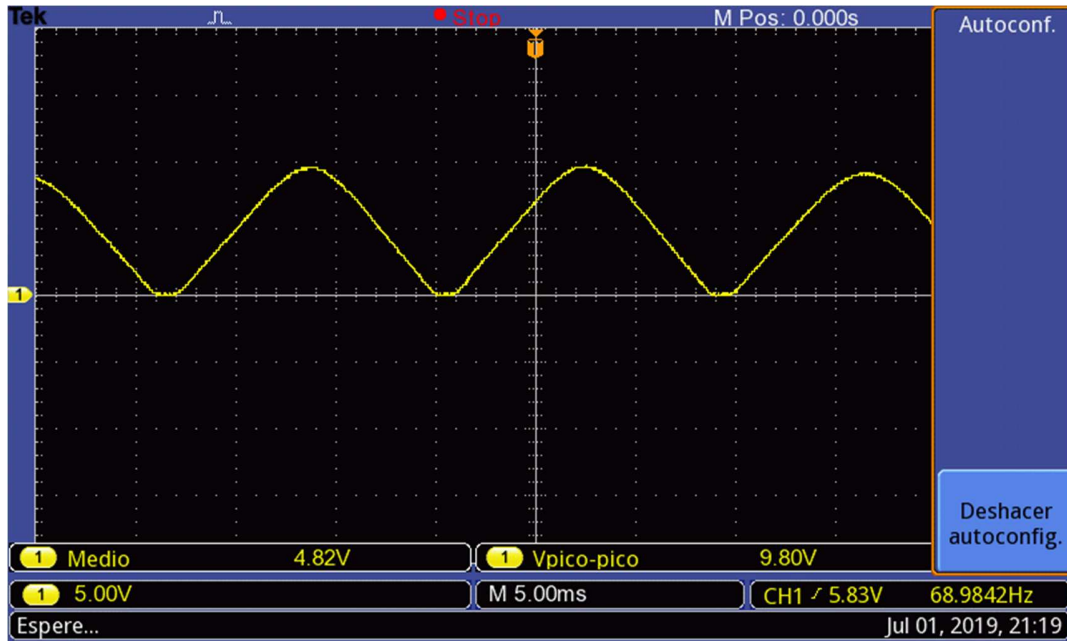


Fig. 97. Señal de salida del rectificador puente de diodos. Fuente propia.

Posteriormente se añade el filtro conformado por capacitores para eliminar los rizados de voltaje de la señal rectificada, en la Fig. 98 se muestra la señal de salida de este filtro con un voltaje de 9V.



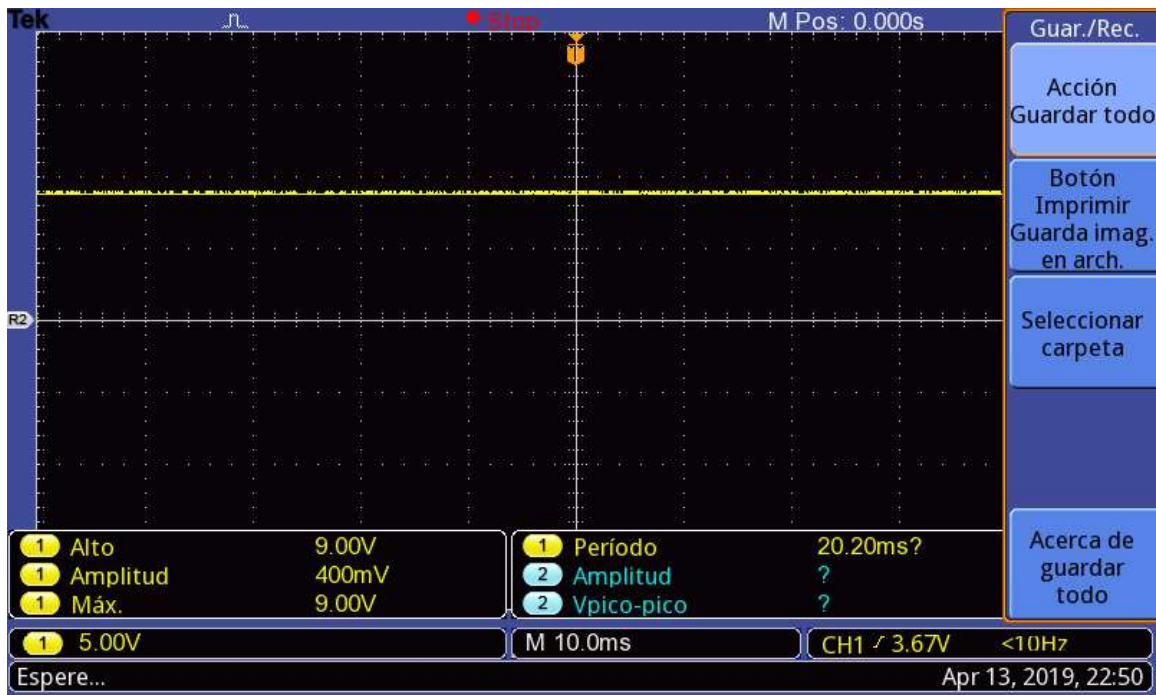


Fig. 98. Señal de salida del filtro compuesto por capacitores.

Para estabilizar el nivel de voltaje, se añadió el convertidor Buck, el cual regula a 5V la señal para tener a la salida una señal más estable. La Fig. 99 muestra la salida regulada a 5V.

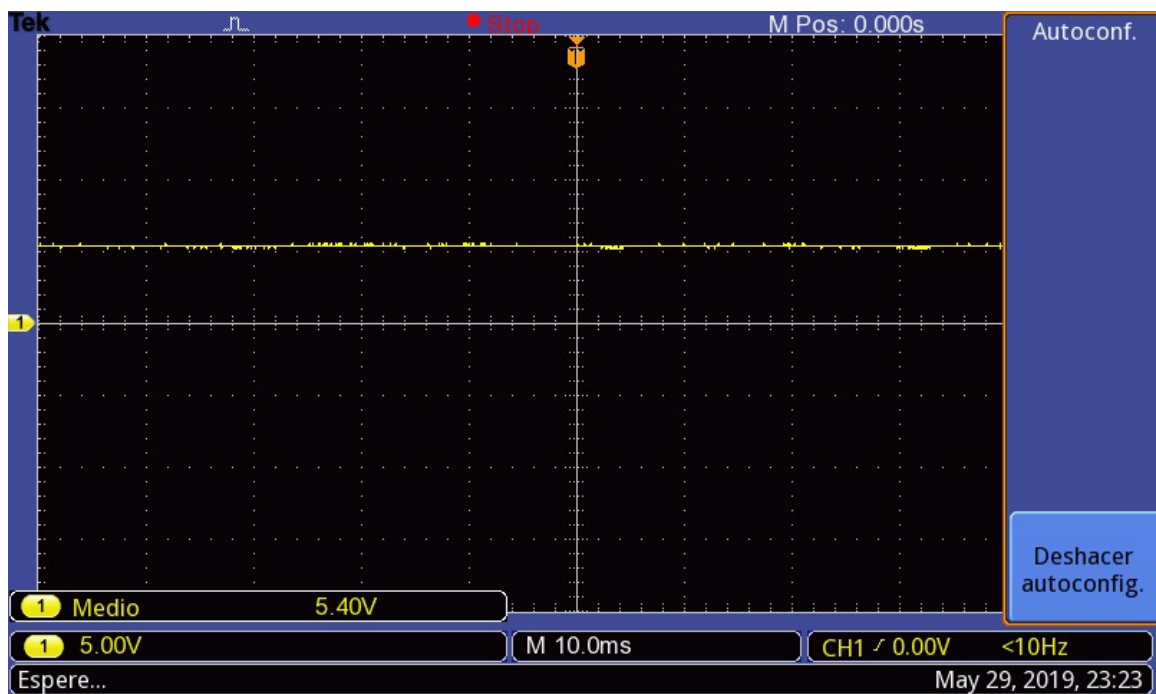


Fig. 99. Señal de salida del convertidor Buck. Fuente propia.

### 4.2.3 Convertidor Boost.

Se añade al circuito de recuperación de energía un módulo MT3608, que consiste en un convertidor Boost con salida regulable que puede variar de 5 a 28V con una corriente máxima de 2A. Este circuito se muestra en la Fig. 100.



Fig. 100. Módulo MT3608 (Convertidor Boost). Fuente propia.

Para cumplir con uno de los objetivos de este trabajo como lo es cargar una batería, se regula la salida del voltaje del convertidor hasta obtener 12V, este nivel de voltaje se muestra en la Fig. 101.

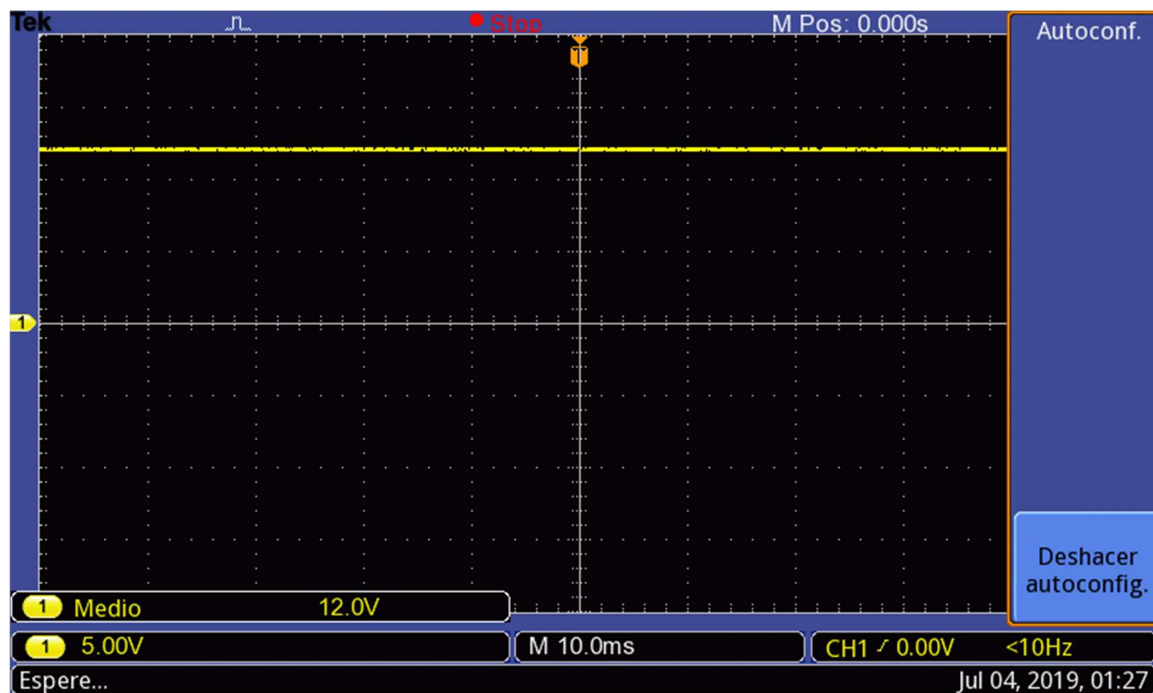


Fig. 101. Señal de salida del convertidor Boost. Fuente propia.

En la Fig. 102 se muestra el banco de pruebas implementado físicamente cuyo diseño parte de la Fig. 59 donde se muestra el motor acoplado por una flecha al generador de imanes permanentes con dos chumaceras que funcionan como apoyo

para la flecha, este sistema está montado sobre una base de madera para brindarle mayor soporte.

Igualmente se presentan los circuitos de control de velocidad y recuperación de energía montados sobre una base de madera para poder manipularlos fácilmente.



*Fig. 102. Banco de pruebas y circuitos electrónicos. Fuente propia.*

# 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

En el presente capítulo se presentan las conclusiones sobre el trabajo presentado donde mencionan las observaciones del trabajo y se nombran recomendaciones para trabajos futuros respecto a esta línea de investigación.



## 5.1 Conclusiones.

El objetivo principal de este trabajo era desarrollar un banco de pruebas para la recuperación de energía eléctrica emulando el flujo de agua en las tuberías de agua potable de las edificaciones a través de un generador de imanes permanentes para el tratamiento de la señal de salida hacia un módulo reductor y elevador de tensión para utilizar esta señal de salida en diferentes aplicaciones.

Es preciso mencionar que se ha cumplido el objetivo principal, el cual se refiere al diseño y construcción del banco de pruebas. Primeramente, se explicaron los conceptos básicos de máquinas eléctricas y electrónica de potencia básica para el diseño del banco de pruebas.

Este trabajo funge como punto de partida para el análisis de los sistemas mecánicos acoplados a elementos electromecánicos que puedan ser usados para el tratamiento de señales o energías residuales en algún sistema de movimiento.

Por lo tanto, la principal aportación de esta tesis consiste en realizar una herramienta como base para futuras investigaciones y generaciones de estudiantes que podrán desarrollar técnicas de control y electrónica de potencia relacionados con el almacenamiento y tratamiento de energía provenientes de sistemas mecánicos de uso convencional.

El banco de pruebas demostró la viabilidad del desarrollo de un sistema de generación de energía a través del flujo de agua en las tuberías, capaz de generar energía para ser almacenada en baterías.

La principal ventaja de este banco de pruebas es tener dos salidas de voltaje, una del convertidor Buck de 5v y otra salida regulable del convertidor Boost de 12V hasta 28V por lo que pueden tener diversas aplicaciones en diferentes dispositivos y utilizarlo para diferentes cargas.

Como comentario final se puede decir que los resultados presentados son la base para la construcción de un sistema de generación de energía que podrá ser instalado en las edificaciones que cuenten con una instalación hidráulica.

## **5.2 Trabajos futuros.**

El banco de pruebas contribuye como un fundamento para nuevas líneas de investigación en la Universidad investigaciones relacionadas con la implementación, el control, automatización o la optimización de este prototipo.

En cuanto a la construcción y diseño de los componentes mecánicos, las áreas de mejora incluyen una revisión a los componentes de refuerzo del banco de pruebas para garantizar una operación libre de vibraciones.

Cabe destacar que este prototipo se puede extrapolar a aplicaciones con flujos de agua más abundantes, por lo que al utilizar la metodología presentada en este trabajo puede adaptarse a diversas aplicaciones.

# REFERENCIAS

- [1] A. Franco y M. Velázquez, “*Una aproximación sociodemográfica al consumo de energía en los hogares mexicanos*”. México: Consejo Nacional de Población, 2014.
- [2] “*Programa de desarrollo del sistema eléctrico nacional 2016-2030*”, Secretaría de Energía. México, 2016. [En línea]. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/98308/PRODESEN-2016-2030\\_1.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/98308/PRODESEN-2016-2030_1.pdf). [Accedido: 01-marzo-19].
- [3] “*Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares 2014*”, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/programas/enigh/nc/2014/>. [Accedido: 01-marzo-19].
- [4] “*Balance Nacional de Energía 2017*”, Secretaría de Energía. México, 2017. [En línea]. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/414843/Balance\\_Nacional\\_de\\_Energ\\_a\\_2017.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/414843/Balance_Nacional_de_Energ_a_2017.pdf). [Accedido: 01-marzo-19].
- [5] “*Balance Nacional de Energía 2016*”, Secretaría de Energía. México, 2016. [En línea]. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/288692/Balance\\_Nacional\\_de\\_Energ\\_a\\_2016\\_\\_2\\_.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/288692/Balance_Nacional_de_Energ_a_2016__2_.pdf). [Accedido:01-marzo-19].
- [6] A. García, “*Instalaciones en los edificios*”. México: Repositorio digital de la Facultad de Ingeniería de la UNAM (RepoFI), 2012.
- [7] F. Hoyos, S. Casanova y D. Vergara, “*Dinámica de un convertidor boost con inclusión de resistencias parásitas controlado con ZAD*”. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2016
- [8] S. Ferrer, “La microturbina hidráulica de Flat Tower Ideas genera electricidad gracias al agua de las tuberías”, *MIT Technology Review*, España, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.technologyreview.es/s/4091/la-microturbina-hidraulica-de-flat-tower-ideas-genera-electricidad-gracias-al-agua-de-las> [Accedido: 03-marzo-19].
- [9] “*Mini turbinas hidráulicas con generador*”, Traxco. España, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://www.traxco.es/blog/productos-nuevos/mini-turbina-hidraulica-con-generador>. [Accedido: 03-marzo-19].
- [10] J. Bermúdez y J. Pedraza, “*Prototipo De Generación De Energía A Partir De Investigación Y Desarrollo Tecnológico En Tecnologías Alternativas*”. Colombia, 2016.

- [11] V. Luna, *“Estudio cuantitativo de imanes permanentes y su campo magnético usados en terapias de biomagnetismo en México”*. México: Universidad La Salle A.C., 2016.
- [12] L. Quispe y R. Apaza, *“Diseño E Implementación De Un Prototipo De Un Generador Magnético Aprovechando La FCEM Como Energía Alternativa”*, Tesis de título profesional. Universidad del Altiplano, Perú, 2017.
- [13] M. Bunge, *“La Ciencia, Su Método Y Su Filosofía”*, vol. 1. España: Laetoli, 2013.
- [14] J. Navasquillo, *“Funcionamiento de un generador de imanes permanentes usando la expresión de Lorentz”*. España: Universidad de Valencia, s.f. [En línea]. Disponible en: [www.uv.es/~navasqui/aero/Fungenper.pdf](http://www.uv.es/~navasqui/aero/Fungenper.pdf). [Accedido: 10-marzo-19].
- [15] N. Mohan, T. Undeland y W. Robbins, *“Electrónica de Potencia: Convertidores, Aplicaciones y Diseño”*, vol. 1, 3ª ed. México: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. DE C.V., 2009.
- [16] S. J. Chapman, *“Máquinas Eléctricas”*, vol.1, 5ª ed. México: McGraw-Hill/Interamericana Editores, 2012.
- [17] J. Fraile, *“Máquinas Eléctricas”*, vol. 1, 5ª ed. España: McGraw-Hill/Interamericana De España, 2003.
- [18] “Apuntes de cátedra de Electrotecnia”, notas de clase para BIO 2014 10108, Departamento de Electrónica y Automática, Universidad Nacional de San Juan, 2014.
- [19] F. Barria, *“Conceptos básicos de máquinas eléctricas”*. [En línea]. Disponible en: [https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2012/1/EL6000/1/material\\_docente/bajar?id\\_material=419801](https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2012/1/EL6000/1/material_docente/bajar?id_material=419801). [Accedido: 10-marzo-19].
- [20] G. Enríquez, *“El libro práctico de los generadores, transformadores y motores eléctricos”*, vol.1, 1ª ed. México: Limusa, 2004.
- [21] J. González, *“Análisis De Los Requisitos Eléctricos Para El Diseño De Un Parque Offshore De Energía Undimotriz”*. [En línea]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4991/fichero/4+Sistemas+de+generación.pdf>. España: Escuela Técnica Superior de Ingeniería, s.f. [Accedido: 15-marzo-19].
- [22] P. Baillarie, *“Diseño De Aerogeneradores Con Imanes Permanentes Para Aplicaciones En Electrificación Rural”*. Tesis de pregrado, Universidad De Chile, 2008.
- [23] M. Mañana, *“Regulación, Control y Protección de Máquinas Eléctricas”*. [En línea]. Disponible en: <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1986/course/section/2310/convertidores.pdf>. España: Universidad de Cantabria. [Accedido: 20-marzo-19]

- [24] J. Aguilar, "Electrónica de Potencia Tema 1: Introducción a los sistemas de potencia". España: Universidad de Valencia. [En línea]. Disponible en: <https://www.uv.es/emaset/descargas/IEP1-0506>. [Accedido: 15-marzo-19].
- [25] O. Jiménez, "*Convertidor CD - CD Reductor Resonante Alimentado con Energía Solar*", Tesis de título profesional. Universidad de las Américas, México, 2004.
- [26] L. Farrera, "*Conductores, semiconductores y aislantes*". [En línea]. Disponible en: [http://www.academia.edu/download/45684776/condsemicondais2\\_27505.pdf](http://www.academia.edu/download/45684776/condsemicondais2_27505.pdf). [Accedido: 12-abril-19]
- [27] D. Hart, "*Electrónica de Potencia*", vol.1, 1ª ed. España: Pearson Educación, 2001.
- [28] T. Floyd, "*Dispositivos electrónicos*", vol.1, 8ª ed. México: Pearson Educación, 2008.
- [29] A. Malvino, "*Principios de electrónica*", vol.1 6ª ed. España: McGraw-Hill/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, 2000.
- [30] E. Maset, "Reguladores e interruptores estáticos de continua". [En línea]. Disponible en: <https://www.uv.es/emaset/iep00/IEP10-0607.pdf>. España: Universidad de Valencia, s.f. [Accedido: 20-abril-19].
- [31] Electrocomponentes S. A., "*Fuentes de alimentación*". [En línea]. Disponible en: [http://www.sase.com.ar/2011/files/2010/11/SASE2011Fuentes\\_de\\_alimentacion.pdf](http://www.sase.com.ar/2011/files/2010/11/SASE2011Fuentes_de_alimentacion.pdf). Argentina: Simposio Argentino de Sistemas Embebidos, 2011. [Accedido: 27-abril-19].
- [32] E. Ortega, "*Desarrollo de convertidores DC-DC para supercapacitor con aplicación en tracción eléctrica*". México, 2012.
- [33] C. Antuna, "*Regulador para el sistema eléctrico automotriz de voltaje dual de 42V/14V*", Tesis de maestría en Control y Sistemas Dinámicos. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C., México, 2018.
- [34] M. Rashid, "*Electrónica de Potencia. Circuitos, dispositivos y aplicaciones*", México: Pearson, 2004.
- [35] Marcos, J. (2010). "*Conversión CA-CC*". España: Área de Tecnología Electrónica, Universidad de Oviedo.
- [36] R. Boylestad y L. Nashelsky, "*Electrónica, Teoría de circuitos*" México: Pearson Educación, 2009.
- [37] L. A. D' Alessio, L. G. González y R. O. Cáceres, "Diseño y Construcción de un Convertidor Boost de Pequeña Potencia, con Propósitos Educativos y de Investigación", *Avances en Ciencias e Ingenierías, dic., 2014*.

[38] F. Padrón, *“Baterías: estado del arte y vigilancia tecnológica 2013”*, Bolivia: Universidad Pontificia Bolivariana, 2013.

[39] J. Guzmán, *“Pilas y baterías ecológicas, una alternativa para la reducción de contaminantes”*, Tesis de pregrado. Instituto Politécnico Nacional, México, 2011.

[40] M. Vergara, *“Tecnología de baterías”*. Chile: Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Electrónica, s.f.

[41] Hitachi Chemical, *“Método de carga”*. [En línea]. Disponible en: [www.csb-attery.com.tw/upfiles/gen01478079036.pdf](http://www.csb-attery.com.tw/upfiles/gen01478079036.pdf). [Accedido: 29-abril-19].

[42] A. Rojas, *“Cálculo hidráulico y dimensionamiento de una turbina Michell-Banki. Diámetro 600mm, velocidad específica 142”*, Trabajo de Diploma, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, 2017.

[43] U. Sánchez, *“Máquinas Hidráulicas”*, España: Editorial Club Universitario, 2013.

[44] J. E. Mastache, *“Análisis de un Generador Radial de Imanes Permanentes y Propuesta de una Metodología para Optimizar la Eficiencia”*, Tesis de maestría en Ciencias. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, México, 2016.

# ANEXOS

International  
**IR** Rectifier

Data Sheet No. PD60147 rev.v

## IR2110(S)PbF/IR2113(S)PbF

### HIGH AND LOW SIDE DRIVER

#### Features

- Floating channel designed for bootstrap operation  
Fully operational to +500V or +600V  
Tolerant to negative transient voltage  
dV/dt immune
- Gate drive supply range from 10 to 20V
- Undervoltage lockout for both channels
- 3.3V logic compatible  
Separate logic supply range from 3.3V to 20V  
Logic and power ground  $\pm 5V$  offset
- CMOS Schmitt-triggered inputs with pull-down
- Cycle by cycle edge-triggered shutdown logic
- Matched propagation delay for both channels
- Outputs in phase with inputs

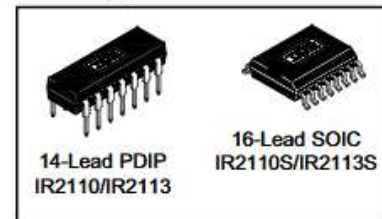
#### Product Summary

$V_{\text{OFFSET}}$ (IR2110)	500V max.
(IR2113)	600V max.
$I_{\text{O}+/-}$	2A / 2A
$V_{\text{OUT}}$	10 - 20V
$t_{\text{on/off}}$ (typ.)	120 & 94 ns
Delay Matching (IR2110)	10 ns max.
(IR2113)	20ns max.

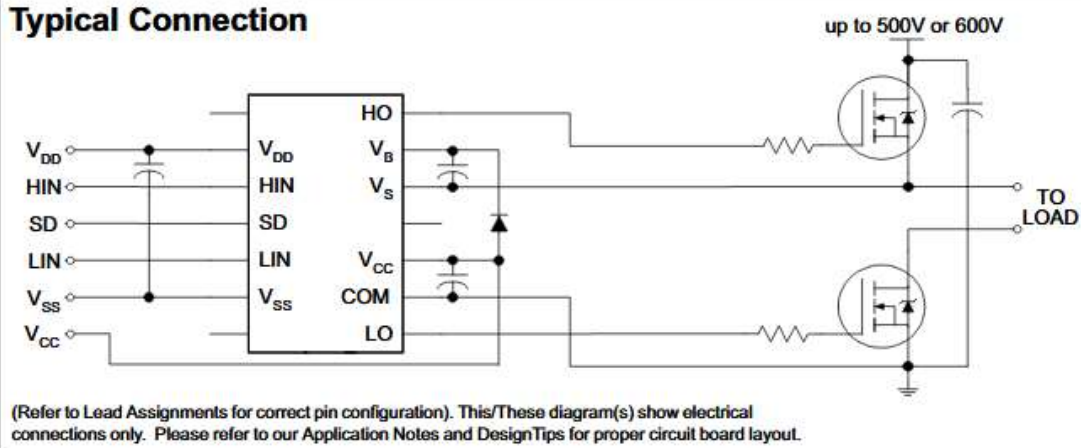
#### Description

The IR2110/IR2113 are high voltage, high speed power MOSFET and IGBT drivers with independent high and low side referenced output channels. Proprietary HVIC and latch immune CMOS technologies enable ruggedized monolithic construction. Logic inputs are compatible with standard CMOS or LSTTL output, down to 3.3V logic. The output drivers feature a high pulse current buffer stage designed for minimum driver cross-conduction. Propagation delays are matched to simplify use in high frequency applications. The floating channel can be used to drive an N-channel power MOSFET or IGBT in the high side configuration which operates up to 500 or 600 volts.

#### Packages



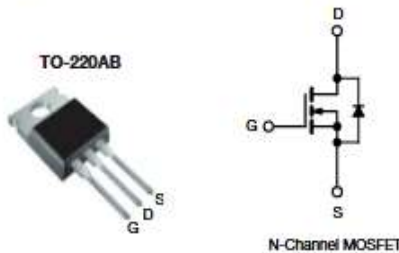
#### Typical Connection





Power MOSFET

PRODUCT SUMMARY		
V <sub>DS</sub> (V)	200	
R <sub>DS(on)</sub> (Ω)	V <sub>GS</sub> = 10 V	0.18
Q <sub>g</sub> (Max.) (nC)	70	
Q <sub>gs</sub> (nC)	13	
Q <sub>gd</sub> (nC)	39	
Configuration	Single	



FEATURES

- Dynamic dV/dt rating
- Repetitive avalanche rated
- Fast switching
- Ease of paralleling
- Simple drive requirements
- Material categorization: for definitions of compliance please see [www.vishay.com/doc?99912](http://www.vishay.com/doc?99912)



Note

<sup>a</sup> This datasheet provides information about parts that are RoHS-compliant and / or parts that are non-RoHS-compliant. For example, parts with lead (Pb) terminations are not RoHS-compliant. Please see the information / tables in this datasheet for details.

DESCRIPTION

Third generation power MOSFETs from Vishay provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness. The TO-220AB package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 W. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220AB contribute to its wide acceptance throughout the industry.

ORDERING INFORMATION	
Package	TO-220AB
Lead (Pb)-free	IRF640PbF SiHF640-E3
SnPb	IRF640 SiHF640

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (T <sub>C</sub> = 25 °C, unless otherwise noted)					
PARAMETER			SYMBOL	LIMIT	UNIT
Drain-Source Voltage			V <sub>DS</sub>	200	V
Gate-Source Voltage			V <sub>GS</sub>	± 20	
Continuous Drain Current	V <sub>GS</sub> at 10 V	T <sub>C</sub> = 25 °C	I <sub>D</sub>	18	A
		T <sub>C</sub> = 100 °C		11	
Pulsed Drain Current <sup>a</sup>			I <sub>DM</sub>	72	
Linear Derating Factor				1.0	W/°C
Single Pulse Avalanche Energy <sup>b</sup>			E <sub>AS</sub>	580	mJ
Repetitive Avalanche Current <sup>a</sup>			I <sub>AR</sub>	18	A
Repetitive Avalanche Energy <sup>a</sup>			E <sub>AR</sub>	13	mJ
Maximum Power Dissipation	T <sub>C</sub> = 25 °C		P <sub>D</sub>	125	W
Peak Diode Recovery dV/dt <sup>c</sup>			dV/dt	5.0	V/ns
Operating Junction and Storage Temperature Range			T <sub>J</sub> , T <sub>stg</sub>	-55 to +150	°C
Soldering Recommendations (Peak temperature) <sup>d</sup>	for 10 s			300	
Mounting Torque	6-32 or M3 screw			10	lbf · in
				1.1	N · m

Notes

- Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).
- V<sub>DD</sub> = 50 V, starting T<sub>J</sub> = 25 °C, L = 2.7 mH, R<sub>θ</sub> = 25 Ω, I<sub>AS</sub> = 18 A (see fig. 12).
- I<sub>SD</sub> ≤ 18 A, dI/dt ≤ 150 A/μs, V<sub>DD</sub> ≤ V<sub>DS</sub>, T<sub>J</sub> ≤ 150 °C.
- 1.6 mm from case.



## SGx524 Regulating Pulse-Width Modulators

### 1 Features

- Complete Pulse-Width Modulation (PWM) Power-Control Circuitry
- Uncommitted Outputs for Single-Ended or Push-Pull Applications
- 8 mA (TYP) Standby Current

### 2 Applications

- Transformer-coupled DC/DC converters
- Switching-regulators of any polarity

### 3 Description

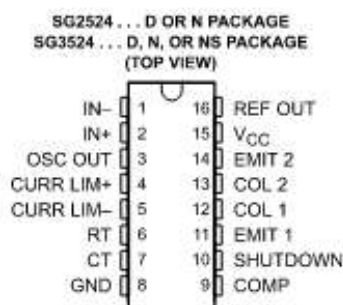
The SG2524 and SG3524 devices incorporate all the functions required in the construction of a regulating power supply, inverter, or switching regulator on a single chip. They also can be used as the control element for high-power-output applications. The SG2524 and SG3524 were designed for switching regulators of either polarity, transformer-coupled dc-to-dc converters, transformerless voltage doublers, and polarity-converter applications employing fixed-frequency, pulse-width modulation (PWM) techniques. The complementary output allows either single-ended or push-pull application. Each device includes an on-chip regulator, error amplifier, programmable oscillator, pulse-steering flip-flop, two uncommitted pass transistors, a high-gain comparator, and current-limiting and shutdown circuitry.

#### Device Information<sup>(1)</sup>

PART NUMBER	PACKAGE (PIN)	BODY SIZE (NOM)
SGx524	SOIC (16)	9.90 mm × 3.91 mm
	PDIP (16)	9.90 mm × 6.35 mm
	NS (16)	10.30 mm × 5.30 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the datasheet.

### 4 Pinout Drawing



An IMPORTANT NOTICE at the end of this data sheet addresses availability, warranty, changes, use in safety-critical applications, intellectual property matters and other important disclaimers. PRODUCTION DATA.

## DC-DC 降压电路 AD84064

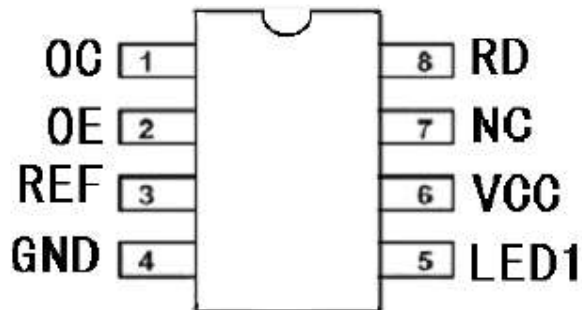
### 概述:

AD84064 是 DC-DC 降压变换器集成电路, 内含温度补偿的参考电压源 (1.25V)、比较器、能有效限制电流及控制工作周期的振荡器、驱动器及大电流输出开关管等, 外配少量元件, 就能组成 DC-DC 降压电路。与 34063 产品比较, 可达到使用最少的外接元件构成开关式降压变换器, 广泛适用于汽车充电器、直流降压变换器等产品。

### 特点:

- 工作电压范围宽: 3.0V~30V;
- 输出电流限制功能和输出电流保护功能;
- 静态电流小;
- 输出管电流达 0.8A;
- 工作频率可达 120KHz;
- 输出电压范围如下:  
AD84064:  $5.0V \pm 2.5\%$ ;
- 封装形式: Qipai8

### 管脚排列图:



### 管脚功能说明:

管脚序号	功能	符号	管脚序号	功能	符号
1	输出管集电极 OC		5	电压输出指示灯	LED1
2	输出管发射极 OE		6	输入电压	VCC
3	电压反馈 REF		7	空	NC
4	地 GND		8	电压识别	RD

### 内部结构图:



**FEATURES**

- Integrated 80mΩ Power MOSFET
- 2V to 24V Input Voltage
- 1.2MHz Fixed Switching Frequency
- Internal 4A Switch Current Limit
- Adjustable Output Voltage
- Internal Compensation
- Up to 28V Output Voltage
- Automatic Pulse Frequency Modulation Mode at Light Loads
- up to 97% Efficiency
- Available in a 6-Pin SOT23-6 Package

**APPLICATIONS**

- Battery-Powered Equipment
- Set-Top Boxes
- LCD Bias Supply
- DSL and Cable Modems and Routers
- Networking cards powered from PCI or PCI express slots

**GENERAL DESCRIPTION**

The MT3608 is a constant frequency, 6-pin SOT23 current mode step-up converter intended for small, low power applications. The MT3608 switches at 1.2MHz and allows the use of tiny, low cost capacitors and inductors 2mm or less in height. Internal soft-start results in small inrush current and extends battery life.

The MT3608 features automatic shifting to pulse frequency modulation mode at light loads. The MT3608 includes under-voltage lockout, current limiting, and thermal overload protection to prevent damage in the event of an output overload. The MT3608 is available in a small 6-pin SOT-23 package.

**TYPICAL APPLICATION**

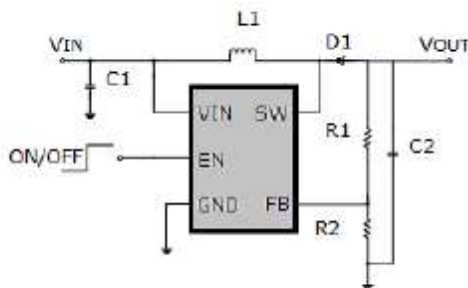


Figure 1. Basic Application Circuit

**Efficiency**

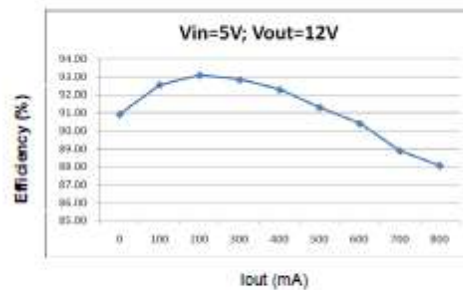


Figure 2. Efficiency Curve