

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“Diseño, Análisis y Construcción de un Sistema de
Bombeo con Motor de Inducción Empleando
Energía Fotovoltaica en Modo Isla”**

POR

Ing. Heriberto Valadez Reyes

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

DIRECTOR DE TESIS

DR. Francisco S. Sellschopp Sánchez

ISSN: 0188-9060



RIITEC: (03)-TMCIE-2015

Torreón, Coahuila, México
Junio 2015

SEP

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico de La Laguna

"2015. Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

Torreón, Coah., **15 de junio 2015**
Dependencia: DEPI/CPCIE
Oficio: DEPI/CPCIE/082/2015
Asunto: Autorización de impresión de tesis.

C. HERIBERTO VALADEZ REYES
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA.
PRESENTE

Después de haber sometido a revisión su trabajo de tesis titulado:

"DISEÑO, ANÁLISIS Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE BOMBEO CON MOTOR DE INDUCCIÓN EMPLEANDO ENERGIA FOTOVOLTÁICA EN MODD ISLA"

Habiendo cumplido con todas las indicaciones que el jurado revisor de tesis hizo, se le comunica que se le concede la autorización con número de registro **RIITEC: (03)-TMCIE-2015**, para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE
EDUCACIÓN TECNOLÓGICA FUENTE DE INNOVACION

DR. JOSÉ LUIS MEZA MEDINA
Jefe de la División de Estudios de Posgrado e Investigación
del Instituto Tecnológico de la Laguna



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO de la Laguna
Oficina de Estudios de Posgrado e Investigación





DR. JOSE LUIS MEZA MEDINA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Por medio de la presente, hacemos de su conocimiento que después de haber sometido a revisión el trabajo de tesis titulado:

"DISEÑO, ANÁLISIS Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE BOMBEO CON MOTOR DE INDUCCIÓN EMPLEANDO ENERGIA FOTOVOLTÁICA EN MODO ISLA"

Desarrollado por el C. Heriberto Valadez Reyes, con número de control M1213023 y habiendo cumplido con todas las correcciones que se le indicaron, estamos de acuerdo que se le conceda la autorización de la fecha de examen de grado para que proceda a la impresión de la misma.

ATENTAMENTE
EDUCACIÓN TECNOLÓGICA FUENTE DE INNOVACIÓN


Dr. Francisco S. Saltschopp Sánchez
Asesor/Director de Tesis


Dr. Marco A. Argueta López
Comité Tutorial


M.E. Ricardo Vargas Salas
Comité Tutorial


Dra. Concepción Hernández Flores
Comité Tutorial



Dedicatoria

Clementina, Heriberto, Fernando, Damacia, Samantha y mi hijo Heriberto

Gracias.

Agradecimientos

Primera y ante todo agradezco a Dios por darme unos padres tan maravillosos y tiempo para disfrutar de ellos, Clementina y Heriberto gracias por su amor, cariño y esfuerzo con lo que han logrado domesticarme.

Al Dr. Sergio Sellschopp por su tiempo, paciencia y apoyo

Al Dr. Marco Arjona y la Dra. Concepción Hernández por darme la oportunidad de ingresar a la maestría, por su tiempo y trabajo invaluable que me brindaron.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo económico durante esta investigación.

Al Instituto Tecnológico de La laguna por el uso de sus instalaciones y laboratorios. Por las personas tan admirables que me dio la oportunidad de conocer, y los innumerables momentos tan felices que pase ahí desde Agosto 2007.

Al Ing. Eloy Santiago gracias por la confianza y oportunidad laboral, y por hacer que este tiempo comience a dar frutos.

A mis compañeros y amigos durante la maestría muchas gracias.

Contenido

Resumen	xii
1. Introducción	
1.1 Antecedentes	1
1.2 Aplicación de los sistemas FV	3
1.3 Justificación	5
1.4 Objetivo de la tesis	6
1.5 Contenido de la tesis	7
2. Convertidores estáticos CD-CD y CD-CA monofásicos	
2.1 Introducción	8
2.2 Convertidores Estáticos CD-CD	9
2.2.1 Pulsador Reductor	11
2.2.2 Pulsador elevador	13
2.2.3 Pulsador reductor-elevador	15
2.2.4 Pulsador Cúk	17
2.2.5 Comparación de convertidores de CC-CC	18
2.3 Convertidores Estáticos CD-CA monofásicos	20
2.3.1 Inversores monofásicos de medio puente	22
2.3.2 Inversores monofásicos de puente completo	23
2.4 Tipos de modulación de ancho de pulso	25
2.4.1 Modulación de un solo ancho de pulso	25
2.4.2 Modulación de varios anchos de pulso	26
2.4.3 Modulación sinusoidal del ancho de pulso	28
2.4.3.1 Simulación de la modulación sinusoidal del ancho de pulso	29
3. Máquina de inducción monofásica y bifásica	
3.1 Introducción	32
3.2 Teoría del motor monofásico de inducción	33

3.2.1	Teoría de doble campo giratorio y de campo cruzado en motores monofásicos	33
3.2.2	Campo magnético rotatorio	36
3.2.3	Circuito equivalente del motor monofásico en estado estable	38
	3.2.3.1 Modelo del motor monofásico	40
	3.2.3.2 Devanados de fase partida	41
	3.2.3.3 Motor de arranque por capacitor	44
	3.2.3.4 Motor con capacitor permanente	46
3.3	Teoría del motor bifásico de inducción	46
	3.3.1 Motor bifásico simétrico	47
	3.3.2 Motor bifásico asimétrico	48
3.4	Variación de velocidad en motores monofásicos	49
	3.4.1 Variación de velocidad por tensión...	50
	3.4.2 Variación de velocidad por voltaje-frecuencia	51

4. Bombas Centrifugas

4.1	Introducción	54
4.2	Términos y conceptos fundamentales	54
4.3	Características de las bombas centrifugas	56
	4.3.1 Elementos de una bomba centrifuga	56
	4.3.2 Potencia y Rendimiento de una bomba centrifuga	57
4.4	Leyes de semejanza y afinidad	58
4.5	Efecto de Cavitación	59
4.6	Modelo de la bomba centrifuga	61
	4.6.1 Simulación de una bomba centrifuga	62

5. Celdas Fotovoltaicas y Almacenamiento de Energía

5.1	Introducción	66
	5.2 Celdas Fotovoltaicas	67
	5.2.1 Datos históricos	67

5.2.2	Efecto Fotovoltaico	67
5.2.3	Estructura de una celda solar	68
5.2.4	Modelo de la celda fotovoltaica	69
5.2.4.1	Curvas de Comportamiento	70
5.3	Almacenamiento de Energía	72
5.3.1	Comportamiento eléctrico de las baterías	74
5.3.2	Baterías de Plomo-Acido	76
5.3.3	Regulador de carga	76
6.	Modelado y simulación del sistema de bombeo.	
6.1	Introducción	79
6.2	Modelado del Motor Monofásico	79
6.3	Simulación Pulsador Reductor-Elevador	81
6.4	Simulación y diseño de etapa de disparos del inversor	84
6.4.1	Modelo de bloques del inversor en Matlab/Simulink	85
6.5	Generación FV y Almacenamiento de energía	86
6.5.1	Batería de 48v, 50 A-H y Celda FV de 50W	86
6.5.2	Batería de 48v, 100A-H y Celda FV de 60W	88
6.6	Simulación del sistema de bombeo	90
7.	Resultados Prácticos del Sistema de Bombeo.	
7.1	Introducción	97
7.2	Características de la Moto Bomba Monofásica	97
7.2.1	Parámetros de la moto-bomba	97
7.2.2	Consideraciones de adecuación del motor monofásico	99
7.2.3	Pruebas operativas al motor de inducción	102
7.3	Diseño de etapa de disparos del inversor	104
7.3.1	Construcción de acoplamiento a la etapa de potencia	107
7.4	Comportamiento Práctico	108
7.4.1	Alimentación a motor monofásico con capacitor	108
7.4.2	Alimentación a motor monofásico con dos inversores	
		112

8. Conclusiones	114
8.1 Conclusiones	114
8.2 Trabajos futuros	115
Referencias	116

Índice de figuras

Figura 1.1 Inversión mundial en energías renovables	2
Figura 1.2 Inversión de energías renovables por sector	2
Figura 1.3 Comparación entre sistemas fotovoltaicos autónomos y conectados a la red en México	3
Figura 1.4 Evolución de los sistemas fotovoltaicos en México	3
Figura 2.1 Bloque de convertidor CD/CD	9
Figura 2.2 Diagrama eléctrico del pulsador reductor	11
Figura 2.3 Circuito equivalente del pulsador reductor, a) funcionando en tiempo 1, b) funcionando en tiempo 2	11
Figura 2.4 Comportamiento de la corriente del inductor vs tiempo	12
Figura 2.5 Diagrama eléctrico del pulsador elevador	13
Figura 2.6 Circuito equivalente del pulsador elevador, a) funcionando en tiempo 1, b) funcionando en tiempo 2	13
Figura 2.7 Comportamiento de la corriente en el inductor vs tiempo	14
Figura 2.8 Diagrama eléctrico del pulsador reductor-elevador	16
Figura 2.9 Circuito equivalente del pulsador reductor-elevador, a) funcionando en tiempo 1, b) funcionando en tiempo 2	16
Figura 2.10 Comportamiento de la corriente en el inductor vs tiempo	17
Figura 2.11 Circuito Eléctrico del convertidor Cúk	18
Figura 2.12 Gráfica de la comparación de eficiencias en las diferentes topologías de convertidores	20
Figura 2.13 Circuito Inversor de medio puente	22
Figura 2.14 Inversor monofásico de puente completo	23

Figura 2.15	Commutación de los transistores en los diferentes tiempos	24
Figura 2.16	Modulación por un solo ancho de pulso	26
Figura 2.17	Modulación por varios pulsos uniformes	27
Figura 2.18	Generación de pulsos uniformes	27
Figura 2.19	Modulación sinusoidal de ancho de pulso	28
Figura 2.20	Generación de pulsos por Modulación sinusoidal de ancho de pulso(SPWM)	28
Figura 2.21	Modelación en MATLAB SIMULINK	30
Figura 2.22	Parámetros de Matlab-Simulink, a) Parámetros Señal sinusoidal(Izquierda), b) Parámetros señal triangular(Derecha)	30
Figura 2.23	Señal portadora (triangular) y señal de referencia (sinusoidal)	31
Figura 2.24	Pulsos a los dispositivos de conmutación de una perna del inversor de puente completo	31
Figura 3.1	Eje magnético producido por el estator monofásico	33
Figura 3.2	Representación del doble campo giratorio	35
Figura 3.3	Desfasamiento de corrientes y posición de bobinas de un motor trifásico	37
Figura 3.4	Obtención del campo magnético giratorio en un estator trifásico	37
Figura 3.5	Circuito equivalente del motor monofásico en estado estable con rotor detenido	39
Figura 3.6	Circuito equivalente considerando campo directo y campo inverso	40
Figura 3.7	Circuitos equivalentes del motor de inducción bifásico asimétrico, considerando el devanado principal y auxiliar del motor de inducción monofásico	40
Figura 3.8	Diagrama eléctrico del motor monofásico de fase partida	42
Figura 3.9	Representación de devanados del motor monofásico de fase partida	42
Figura 3.10	Comportamiento de la corriente en el devanado primario	43
Figura 3.11	Comportamiento de la corriente en el devanado auxiliar	43

Figura 3.12 Comportamiento de la velocidad de rotor	43
Figura 3.13 Comportamiento del par electromagnético	43
Figura 3.14 Diagrama del motor de arranque por capacitor	44
Figura 3.15 Comportamiento de la corriente en el devanado primario	45
Figura 3.16 Comportamiento de la corriente en el devanado auxiliar	45
Figura 3.17 Comportamiento de la velocidad en el motor	45
Figura 3.18 Comportamiento del par electromagnético	45
Figura 3.19 Diagrama de motor de arranque y marcha con capacitor	46
Figura 3.20 circuitos equivalentes del motor bifásico asimétrico	48
Figura 3.21 Gráfica de par inducido vs velocidad mecánica ante diferentes valores de tensión de un motor de inducción monofásico	51
Figura 3.22 Gráfica del par inducido vs velocidad mecánica con variación de voltaje/frecuencia	53
Figura 4.1 Representación de los conceptos fundamentales de un sistema de bombeo	55
Figura 4.2 Elementos de una bomba centrífuga	57
Figura 4.3 Diagrama de Sankey de una bomba centrífuga	58
Figura 4.4 Efecto de cavitación sobre la curva característica de la bomba altura vs caudal	60
Figura 4.5 Diagrama de bloques de la bomba centrífuga en MATLAB-Simulink	63
Figura 4.6 Parámetros de la bomba	64
Figura 4.7 Presión ejercida por la bomba	64
Figura 4.8 Volumen del depósito receptor	65
Figura 4.9 Caudal en la tubería en litros por minuto	65
Figura 5.1 representación del funcionamiento de una celca solar	68

Figura 5.2 De izquierda a derecha, módulos monocristalino, policristalino y amorfo	68
Figura 5.3 Circuito correspondiente a la ecuación del modelo de la celda fotovoltaica	70
Figura 5.4 Modelo de la celda fotovoltaica	70
Figura 5.5 Modelo del módulo FV	71
Figura 5.6 Gráfica V-I del comportamiento del módulo FV	71
Figura 5.7 Gráfica V-P del comportamiento del módulo FV	72
Figura 5.8 Diagrama de conexión con arreglo de baterías	73
Figura 5.9 Gráfica representativa de la densidad de energía en las distintas baterías	74
Figura 5.10 Diagrama eléctrico de las baterías	75
Figura 5.11 Diagrama eléctrico de las baterías	75
Figura 5.12 Estructura de una batería Plomo-Acido	76
Figura 5.13 Comportamiento de los materiales ante la carga y la descarga	77
Figura 5.14 Comportamiento de la batería en estado de carga	78
Figura 5.15 Ciclo de vida útil ante el porcentaje de descarga	78
Figura 6.1 Parámetros del motor monofásico MATLAB-SIMULINK	80
Figura 6.2 Modelo del Motor monofásico construido en SIMULINK	80
Figura 6.3 Modelado del convertidor en MATLAB-SIMULINK	82
Figura 6.4 Gráfica de la tensión de entrada y tensión de salida en un pulsador reductor-elevador	83
Figura 6.5 Gráfica de la corriente en la carga de un pulsador	83
Figura 6.6 Lógica de disparos del inversor en MATLAB-Simulink	84
Figura 6.7 Disparos de los inversores con un desfaseamiento de 90° eléctricos	85

Fig. 6.8 Inversores tipo puente de onda completa para el devanado principal y auxiliar de motor de inducción	85
Fig. 6.9 Modelo de la etapa de generación y almacenamiento de energía	86
Figura 6.10 Potencia entregada hacia los inversores que alimentan al motor de inducción a diferentes horas del día	87
Figura 6.11 Gráfica de Porcentaje de carga e irradiación solar a diferentes horas del día	88
Figura 6.12 Gráfica de Corriente de la batería a diferentes horas del día	88
Figura 6.13 Potencia entregada hacia el inversor a diferentes horas del día	89
Figura 6.14 Porcentaje de carga de la batería	89
Figura 6.15 Corriente en la batería	90
Figura 6.16 Voltaje en la batería	90
Figura 6.17 Modelo completo del sistema de bombeo en MATLAB SIMULINK	91
Figura 6.18 Respuesta al control con referencia de frecuencia a 60 Hz	92
Figura 6.19 Respuesta al control	92
Figura 6.20 Comportamiento ante 35 litros por minuto	93
Figura 6.21 Comportamiento ante 24 litros por minuto	93
Figura 6.22 Comportamiento del sistema de bombeo ante una perturbación	94
Figura 6.23 Velocidad del motor debido a la perturbación aplicada	95
Figura 6.24 Litros por minuto a la salida de la bomba debido a la perturbación aplicada	95
Figura 6.24 Comportamiento del sistema de bombeo a 35 litros por minuto y una perturbación a los 4s	96
Figura 6.26 Litros por minuto máximos a la salida de la bomba	96
Figura 7.1 Gráfica del comportamiento de la bomba centrífuga	98
Figura 7.2 Sensor de caudal	98

Figura 7.3 Gráfica obtenida del sensor de flujo mediante LabVIEW	99
Figura 7.4 Diagrama eléctrico del motor bifásico asimétrico	99
Figura 7.5 Imagen del motor monofásico después de aislar sus bobinas eléctricamente	100
Figura 7.6 Imagen del motor bifásico alimentado por dos inversores monofásicos	100
Figura 7.7 Diagrama eléctrico del motor bifásico asimétrico alimentado por dos inversores monofásicos, con el inversor auxiliar alimentando corriente a -90°	101
Figura 7.8 Diagrama eléctrico del motor bifásico asimétrico alimentado por dos inversores monofásicos, con el inversor auxiliar alimentando corriente a -90°	102
Figura 7.9 Comportamiento de la corriente de entrada al motor a diferentes frecuencias y nivel de tensión de 10 volts	103
Figura 7.10 Diagrama de bode para los devanados principal y auxiliar	104
Figura 7.11 Simulación de la etapa de control de disparos en ARES-Proteus	105
Figura 7.12 Simulación de Sincronización de microcontroladores en ARES-Proteus	105
Figura 7.13 Osciloscopio de ARES-Proteus. Visualización de las señales de disparo desfasadas a 90°	106
Figura 7.14 Imágenes del osciloscopio, a) Señal auxiliar (azul) con 90° de atraso. b) Señal auxiliar con retraso de 90°	106
Figura 7.15 Diagrama Drive utilizado para enlazar la etapa de control con la etapa de potencia	107
Figura 7.16 PCB del Drive utilizado para enlazar la etapa de control con la etapa de potencia	108
Figura 7.17 Vista 3-D del Drive utilizado para enlazar la etapa de control con la etapa de potencia	108
Figura 7.18 Gráfica del voltaje nominal en terminales de cada bobina del motor	109
Figura 7.19 Gráfica de corriente nominal en cada bobina del motor	109

Figura 7.20 Gráfica del flujo de agua por la tubería en litros por minuto	110
Figura 7.21 Gráfica del Voltaje de 30v y 60Hz en terminales del motor	110
Figura 7.22 Gráfica del Comportamiento de la corriente a 30v y 60Hz en terminales del motor	111
Figura 7.23 Gráfica del Comportamiento de los voltajes ante un inversor monofásico SPWM con una frecuencia de conmutación de 16 KHz	111
Figura 7.24 Gráfica del Comportamiento de las corrientes ante un inversor monofásico SPWM con una frecuencia de conmutación de 16 KHz	112
Figura 7.25 Gráfica del Comportamiento de los voltajes ante un inversor bifásico SPWM con una frecuencia de conmutación de 16 KHz la frecuencia de referencia es 20 Hz.	112
Figura 7.26 Gráfica del Comportamiento de las corrientes ante un dos inversores monofásicos SPWM con una frecuencia de conmutación de 16 KHz la frecuencia de referencia es 20 Hz.	113
Figura 7.27 Gráfica del Comportamiento del caudal de agua en la tubería	113

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

En la actualidad se pueden encontrar un sinnúmero de aplicaciones pensadas en aprovechar las fuentes de energía renovables ya sea del sol, agua o aire. Desde tiempo atrás se vienen utilizando este tipo de energías provenientes de efectos cíclicos, como mencionar las turbinas de viento que se utilizaban para bombear agua, mover mecanismos de molinencia etc. De la energía solar también se tienen datos de su aprovechamiento, los antepasados utilizaban el calor del sol para secar frutos y las pieles de los animales que cazaban. A lo largo de la historia estas técnicas han ido evolucionando, hoy se pueden encontrar generadores de energía que tienen como su fuerza motriz el aire o las caídas del agua, también la energía solar fue evolucionando hasta obtener módulos fotovoltaicos los cuales son capaces de generar energía eléctrica a través de la energía luminosa irradiada por el sol. Todo este tipo de desarrollo tecnológico basado en el aprovechamiento de la energía se ha convertido en prioridad para los centros de investigación y los gobiernos de diferentes países los cuales se han propuesto invertir grandes sumas de dinero con la intención de tener un planeta menos contaminado dejando de lado los combustibles fósiles y aprovechando las bondades de los efectos cíclicos. Según la secretaria de economía la inversión mundial en energías renovables arrojan los datos que se pueden observar en la fig. 1.1. China y Estados Unidos llevan ventaja sobre los demás países.



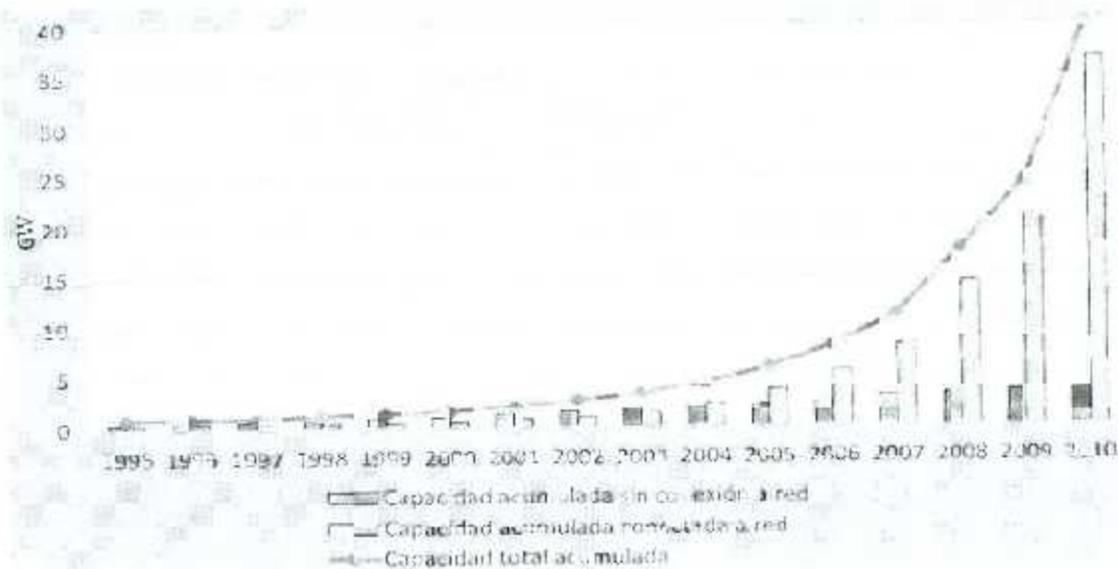
Figura 1.1 Inversión mundial en energías renovables.

Las energías renovables se pueden categorizar de acuerdo a la forma de obtención de energía, siendo la energía solar la que más inversión tiene, seguida de la energía eólica. En la fig. 1.2 se encuentra la inversión por sector.



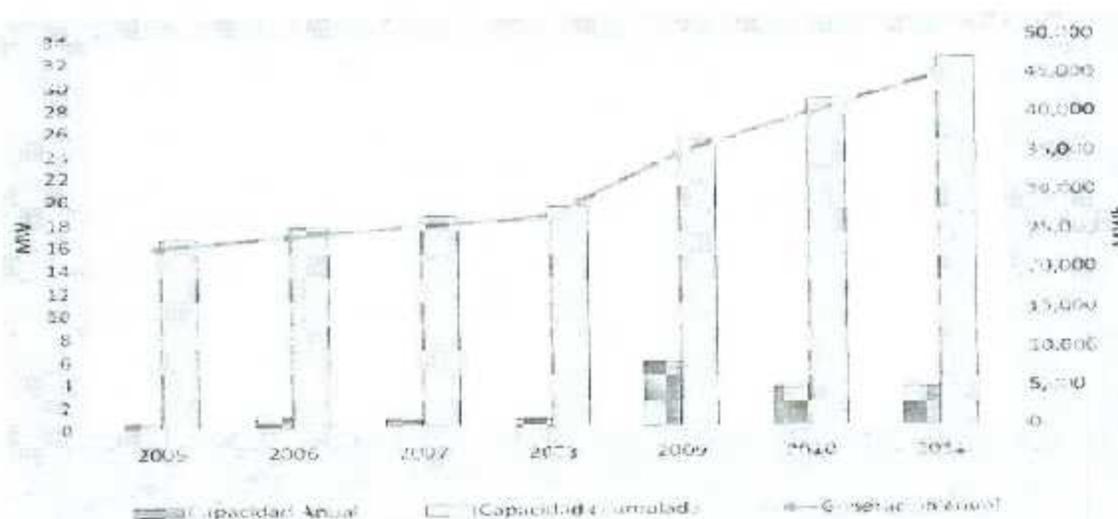
Figura 1.2 Inversión de energías renovables por sector

De 1993 a 2003 la capacidad instalada de sistemas fotovoltaicos en México se incrementó de 7 a 15 MW generando más de 8,000 MWh/año para electrificación rural, bombeo de agua e iluminación según la comisión nacional para el ahorro de energía en México, [1].



Fuente: Elaboración GIZ con datos de SEN 2011

Figura 1.3 Comparación entre sistemas fotovoltaicos autónomos y conectados a la red en México.



Fuente: Elaboración propia con datos de SENIER, 2012

Figura 1.4 Evolución de los sistemas fotovoltaicos en México.

1.2. Aplicación de los sistemas FV

Los módulos fotovoltaicos presentan grandes ventajas, entre las que se pueden mencionar son de bajo mantenimiento, largo tiempo de vida útil, no presentan residuos contaminantes y son de fácil instalación, por lo contrario las desventajas que presentan son: un alto costo

inicial y el hecho de que ante días nublados presentan una menor generación de energía eléctrica.

Los módulos fotovoltaicos se pueden utilizar en dos diferentes esquemas, uno es conectarlos a la red eléctrica y el otro es conectarlo en modo aislado para alimentación de cargas. Los sistemas FV son altamente rentables cuando el requerimiento de energía es menor de 10 KW y donde las líneas de distribución de energía no están disponibles [2]. Al utilizar las celdas en modo aislados se desglosan dos topologías distintas, utilizar un banco de baterías para almacenar energía o consumir la energía conforme sea generada.

Una etapa importante entre los módulos FV y la carga son los convertidores DC-DC los cuales se encargan de ajustar un voltaje variable, ya sea elevando o reduciendo el voltaje para ajustarlo a la carga, donde los módulos FV pueden ser utilizados a libre demanda de la carga o con un seguidor del punto máximo de potencia (de sus siglas en inglés MPPT). El MPPT es un sistema electrónico colocado entre los módulos FV y la carga el cual permite extraerle al módulo FV la máxima corriente posible y con esto aumentar la potencia del módulo FV, [3]. En esta etapa del sistema se pueden alimentar equipos diseñados para CD, sistemas de carga de baterías o conectarse a buses de CD.

Cuando la finalidad de la generación de energía por medio FV es para convertirla a CA, es necesaria la utilización de un convertidor CD-CA, conocido como inversor. Con esto es posible conectar equipos eléctricos en modo aislado de la red o modo isla, pero también es posible interconectarse a la red eléctrica, considerando que el inversor tiene la capacidad de sincronización, detección de red eléctrica desconectada y de inyección de potencia. Cuando la aplicación de la generación FV es para alimentar cargas en modo isla, se debe considerar que la extracción de energía FV es cuando se tiene un cierto nivel de irradiancia, por lo que el tiempo disponible se centra a varias horas del día entre la mañana y la tarde de cada día. Por tanto, la utilización de los equipos durante la noche quedaría restringida en caso que no existan medios de almacenamiento de energía, como son los bancos de baterías. Es entonces cuando es necesaria la evaluación del dimensionamiento del arreglo FV y la capacidad de almacenamiento del banco de baterías.

Por otro lado, las energías renovables a base de agua, viento y sol han permitido el desarrollo de pequeñas comunidades que se encuentran alejadas de cualquier suministro

eléctrico convencional, por lo que este tipo de generación de energía eléctrica es una opción muy viable para que estas comunidades detonen aspectos como la agricultura al emplear riegos tecnificados, la iluminación de alta eficiencia y el empleo de equipos de ventilación, entre otras cosas más.

En esta tesis se mencionan diferentes tipos de topologías y se desglosa el inversor tipo puente completo con la técnica de modulación sinusoidal de ancho de pulso (SPWM). El SPWM fue elegido por las características que presenta, entre las que se puede mencionar un bajo contenido armónico, bajos recursos de cómputo, y es la más utilizada en la industria en los variadores de velocidad para motores de inducción.

El uso del motor de inducción aumentó considerablemente gracias a la modulación del ancho de pulso PWM, de Shantung y Stinmler en 1964 [4], que sumado al avance de la tecnología en semiconductores de potencia hizo posible la construcción del inversor de voltaje para motores síncronos y asíncronos.

Las dos razones principales por las que se utilizan los variadores de velocidad son el control de procesos y el ahorro de la energía. Para variar la velocidad en un motor trifásico se pueden utilizar diferentes técnicas siendo la más utilizada la variación de frecuencia y voltaje de alimentación. Por otro lado la limitación que tiene el motor monofásico al no contar con campo rotatorio no permite las facilidades que da el motor trifásico. En esta tesis se presenta una propuesta en la cual el motor monofásico es alimentado por dos fuentes monofásicas independientes controladas por dos inversores separados, para esto es necesario aislar eléctricamente sus bobinas que están separadas 90° y su alimentación debe de presentar también el mismo desfaseamiento. Para esto se construyeron dos inversores monofásicos y el motor pasó a representar un motor bifásico asimétrico.

1.3. Justificación

La necesidad de riego surge a partir del incremento de la población y la dificultad del cultivo en áreas semiáridas o secas. A nivel mundial las zonas secas y semisecas ocupan cerca del 60% de la superficie de la tierra firme [5]. De la superficie total mundial

normalmente se cultiva cerca del 11%. Cerca de un 40% de las tierras cultivables se encuentran en zonas húmedas, alrededor de un 40% en zonas secas, el 15 % en zonas semisecas y el 5 % restante se sitúan las zonas donde el cultivo sin riego es prácticamente nulo [6].

En México existen alrededor de 200 millones de hectáreas de superficie total. Para efectos agropecuarios, las zonas áridas ocupan el 50% de la superficie, las semiáridas el 14%, 19% las zonas templadas, y las zonas tropicales húmedas solo el 12.5%, [7].

Se pueden encontrar distintas formas de riego, mediante el uso de bombas eléctricas, bombas de diesel, uso de canales o la combinación de cualquiera de los tres. La bomba centrífuga es el tipo de bomba más utilizada para bombear agua clara por su alta eficiencia y gran capacidad para bombear un elevado volumen de agua. [8].

Centrándose en las necesidades de riego, y que la proliferación de pequeños invernaderos puede ser una opción para la siembra y riego controlado de diversas plantaciones, el uso de la energía FV para alimentar equipos de bombeo de baja potencia llega a ser atractivo, sobre todo porque es posible acceder a sistemas de generación FV de baja potencia, combinado con elementos almacenadores de energía eléctrica.

1.4. Objetivo de la tesis

El objetivo de esta tesis es realizar un estudio de un sistema de riego tecnificado aplicado a invernaderos, empleando un motor monofásico operado como motor bifásico y alimentado con dos inversores en forma ortogonal con la finalidad de dimensionar adecuadamente la capacidad de generación del arreglo FV en modo isla y la capacidad de almacenamiento del banco de baterías. Esta propuesta se busca desarrollar como prototipo y probar la operación de dicho sistema.

1.5. Contenido de la tesis

El contenido de cada uno de los capítulos de esta tesis se describe a continuación:

En el presente capítulo se presenta una breve descripción sobre la introducción del tema de esta tesis, se menciona el objetivo y justificación de la misma.

El capítulo dos trata sobre los convertidores DC-DC, los esquemas de modulación que se emplean en los convertidores de potencia, así como el modelo de esquema de modulación SPWM.

El capítulo tres presenta una descripción a detalle del motor monofásico, su construcción, su comportamiento y diversos análisis a tratar, se menciona la similitud que tiene con el motor de inducción bifásico, así como también sus ventajas y limitaciones.

El capítulo cuatro describe un breve análisis mecánico sobre las bombas centrifugas, se mencionan distintos parámetros que se tienen que contemplar a la hora de seleccionar una bomba para cierta aplicación y diferentes conceptos que se consideraron importantes.

El capítulo cinco presenta una investigación sobre las celdas solares, su funcionamiento, su desarrollo a través de la historia. También se habla sobre almacenamiento de energía, la batería más utilizada hasta ahora en energía fotovoltaica y se hace una comparación de las características con otras baterías.

El capítulo 6 presenta resultados en los simuladores, se trabajó con MATLAB-Simulink y Ares Proteus 8, se simuló el motor de inducción, los convertidores DC-DC, DC-AC, el comportamiento del módulo FV y del banco de baterías.

El capítulo 7 se presentan los resultados de laboratorio, se presentan imágenes de osciloscopio y gráficas medidas con el software LAB-View.

Finalmente en el capítulo 8 se describen las conclusiones y trabajos futuros.

Capítulo 2

Convertidores Estáticos CD-CD y CD-CA Monofásicos

2.1 Introducción.

Los convertidores estáticos de potencia son dispositivos que forman parte importante en el proceso de generación de electricidad cuando se utilizan celdas fotovoltaicas. El proceso de conversión de las celdas fotovoltaicas da como resultado la obtención de una fuente de corriente directa (CD) que depende de la irradiación del sol y la temperatura que toman los dispositivos fotovoltaicos. Con la finalidad de utilizar esta energía de forma adecuada se emplean convertidores estáticos que permiten obtener las cantidades eléctricas que serán empleadas para la alimentación de cargas, bancos de baterías o la generación de electricidad para enviarla a la red eléctrica.

En el caso específico de la generación de energía eléctrica por medios fotovoltaicos para la alimentación de motores eléctricos empleados en el riego de grandes invernaderos, los convertidores estáticos necesarios pueden ser los pulsadores e inversores. Si el motor principal de la bomba es de CD, entonces será suficiente emplear un pulsador para adecuar el nivel de CD hacia el motor, pero si el motor es de corriente alterna (CA), entonces será necesario emplear un pulsador para regular la etapa de CD, y posteriormente utilizar un inversor para la conversión de CD a CA. Por otra parte, los requerimientos de riego en los invernaderos dependen del tipo de plantación, por lo que llega a ser necesaria la utilización de medios de almacenamiento de energía eléctrica. Para este caso, la carga de baterías

mediante los módulos fotovoltaicos requiere usar reguladores y medios de desconexión con la finalidad de evitar la sobrecarga y el inminente daño de las baterías.

2.2 Convertidores Estáticos CD-CD

El convertidor CD-CD puede caracterizarse como un dispositivo de tres terminales, figura 2.1, donde el voltaje de CD de entrada es modificado en amplitud a un voltaje de CD de salida mediante la variación de la modulación de ancho de pulso y la frecuencia de interrupción que se alimenta por la tercera terminal



Figura 2.1 Bloque de convertidor CD/CD

La señal de control en el convertidor permite modificar o mantener constante el voltaje de salida, dependiendo del voltaje de entrada, es decir, puede trabajar como un regulador de tensión cuando el voltaje de entrada presenta variaciones. Para esto, la señal de control sería el ciclo de trabajo del interruptor estático que compone al pulsador. Por lo tanto, dependiendo si el voltaje de salida es mayor o menor que el voltaje de entrada, el convertidor se le puede nombrar pulsador elevador, pulsador reductor o pulsador reductor-elevador. Así mismo, a este dispositivo también se le conoce como transformador electrónico, [9].

Los elementos que componen un pulsador son básicamente un inductor L , un capacitor C , un interruptor estático y un diodo, donde el interruptor estático cumple la función específica de alimentación al inductor, que depende de la configuración de pulsador elevador, reductor o reductor-elevador. Esta alimentación al inductor lo carga con corriente, y liberará la energía a través del capacitor y la carga, esta liberación de energía del inductor al capacitor define el tipo de pulsador.

La energía que almacena el inductor y el capacitor se definen de la siguiente forma:

$$\text{Energía}_{\text{inductor}} = \frac{1}{2} L \cdot i_L^2 \quad (2.1)$$

$$\text{Energía}_{\text{capacitor}} = \frac{1}{2} C \cdot v_C^2 \quad (2.2)$$

Donde i_L y v_C son la corriente que atraviesa al inductor y el voltaje en terminales del capacitor, respectivamente.

Las ecuaciones fundamentales de voltaje del inductor y corriente del capacitor son:

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.3)$$

$$i_C = C \frac{dv_C}{dt} \quad (2.4)$$

La configuración en las conexiones entre inductor, capacitor, interruptor estático y diodo permiten obtener los pulsadores en sus diferentes tipos.

En un convertidor CC-CC con un voltaje de entrada dado, el voltaje medio de salida se controla mediante el control de los tiempos de encendido y apagado ($t1$ y $t2$). El valor medio V_a del voltaje de salida depende directamente de los tiempos $t1$ y $t2$, el método es llamado de frecuencia constante y se refiere a que el periodo de conmutación permanecerá fijo, $T_s = t1 + t2$. El ajuste de la duración de encendido del interruptor para controlar el voltaje medio de salida estará a cargo de la relación de trabajo D , que se define como la proporción de la duración de encendido con el periodo de conmutación.

Algunas de las aplicaciones en donde los pulsadores se utilizan ampliamente es en el control de motores de tracción en automóviles eléctricos, tranvías eléctricos, grúas, montacargas y elevadores de minas entre otros. También se utilizan en los reguladores de voltaje de cd especialmente para los inversores de voltaje. Esto se consigue mediante la modulación de ancho de pulso a una frecuencia fija.

2.2.1 Pulsador reductor

El pulsador reductor obtiene un voltaje promedio de salida menor que el voltaje de entrada. En la figura 2.2 se muestra el diagrama de un regulador reductor. La operación del circuito se puede explicar en dos tiempos. El tiempo 1 empieza cuando se activa el interruptor estático. La corriente de entrada se eleva y fluye a través del inductor, del capacitor y de la carga, figura 2.3a. El tiempo 2 empieza cuando se desactiva el interruptor estático, por lo que el diodo es forzado a conducir debido a la energía almacenada en el inductor, por lo que la corriente continua fluyendo a través del inductor, el capacitor, la carga y el diodo. Figura 2.3b.

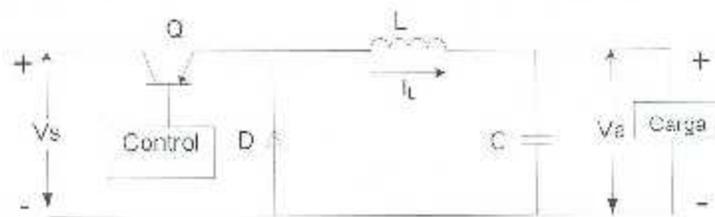


Figura 2.2 Diagrama eléctrico del pulsador reductor

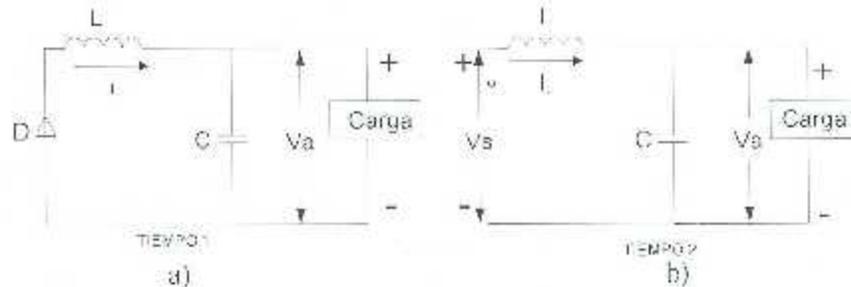


Figura 2.3 Circuito equivalente del pulsador reductor, a) funcionando en tiempo 1, b) funcionando en tiempo 2

El voltaje presente en el inductor es

$$v_L = L \frac{di}{dt} \quad (2.5)$$

Si se considera que la corriente del inductor en la etapa de rizado estable se eleva linealmente desde su corriente inicial I_1 hasta su corriente final I_2 en el tiempo t_1 donde V_s es el voltaje de entrada y V_a es el voltaje a la salida, figura 2.4, se tiene (2.6)

$$V_s - V_a = L \frac{i_2 - I_1}{t_1} = L \frac{\Delta I}{t_1} \quad (2.6)$$

Se simplifica despejando el tiempo en encendido y se obtiene

$$t_1 = \frac{\Delta I L}{V_s - V_a} \quad (2.7)$$

La corriente del inductor disminuye linealmente desde I_2 hasta I_1 en el tiempo 2.

$$-V_a = -L \frac{\Delta I}{t_2} \quad (2.8)$$

Se despeja la ecuación anterior y se obtiene t_2 ,

$$t_2 = L \frac{\Delta I}{V_a} \quad (2.9)$$

Con los valores de t_1 y t_2 se obtiene el periodo de conmutación $T_s = t_1 + t_2$, con el valor inverso de T_s , $1/T_s$ se obtiene la frecuencia de conmutación fija a la que se estará conmutando el interruptor estático. Este desarrollo se realiza buscando los valores de los periodos t_1 y t_2 y buscando el valor de la frecuencia de conmutación. La ec (2.6) permite la libertad de plantear los valores de conmutación y llegar al valor del inductor o de la componente ondulatoria pico a pico del inductor L . Este análisis se realizó suponiendo que el valor del capacitor es lo suficientemente grande para despreciar el rizo de V_a .

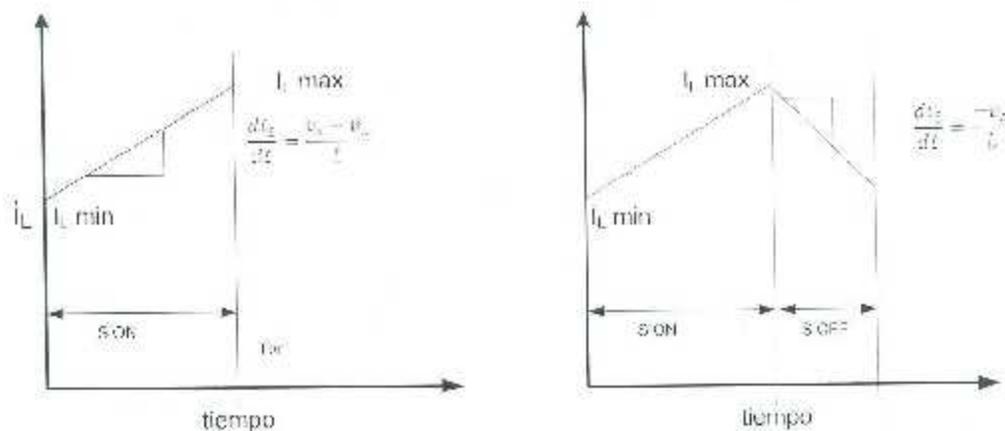


Figura 2.4 Comportamiento de la corriente del inductor vs tiempo

2.2.2 Pulsador elevador.

El voltaje de salida del pulsador elevador es mayor que el voltaje de entrada, figura 2.5. Al igual que el regulador reductor se puede explicar en dos tiempos. El tiempo 1 empieza cuando se activa el interruptor estático. La corriente de entrada se eleva, fluye a través del inductor y del interruptor, figura 2.6a. El tiempo 2 empieza cuando se desconecta el interruptor estático. La corriente que estaba fluyendo a través del interruptor fluirá a través del inductor, el capacitor, la carga y el diodo. La corriente disminuye en el inductor hasta que se vuelve a repetir el siguiente ciclo. La energía almacenada en el inductor es transferido a la carga, figura 2.6b.

Un pulsador elevador puede elevar la tensión de salida sin necesidad de un transformador. Debido a que solo tiene un transistor, su eficiencia es alta [9], y la corriente permanece continua. Es necesario tener cuidado durante la etapa de tiempo 1, ya que a través del interruptor estático fluye una corriente de pico que es elevada.

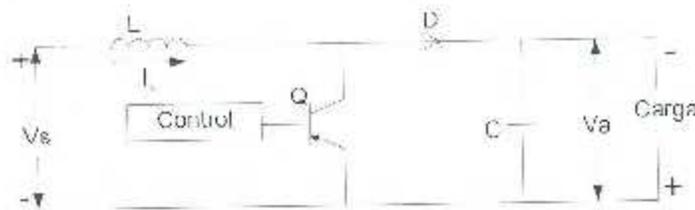


Figura 2.5 Diagrama eléctrico del pulsador elevador.

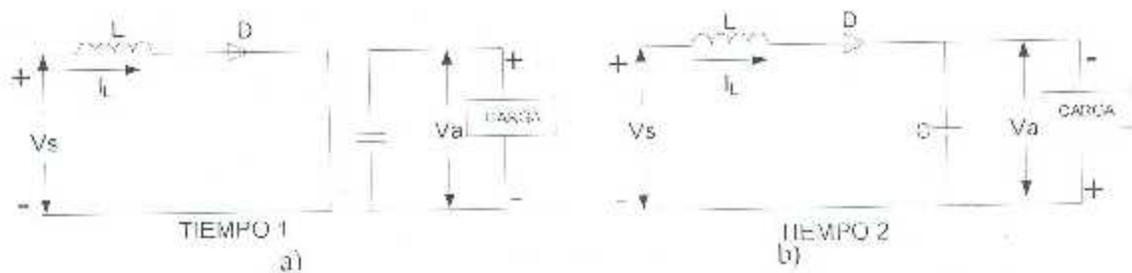


Figura 2.6 Circuito equivalente del pulsador elevador. a) funcionando en tiempo 1, b) funcionando en tiempo 2.

De igual forma se realiza la suposición que la corriente en el inductor en la etapa de rizado estable se eleva linealmente en el tiempo t_1 .

$$V_s = L \frac{i_2 - i_1}{t_1} = L \frac{\Delta i}{t_1} \quad (2.10)$$

Para obtener el tiempo de encendido despejamos t_1 .

$$t_1 = \frac{\Delta i L}{V_s} \quad (2.11)$$

En el tiempo 2 la corriente se abate linealmente.

$$V_s - V_a = -L \frac{\Delta i}{t_2} \quad (2.12)$$

De la ecuación anterior despejamos el tiempo de apagado t_2

$$t_2 = \frac{\Delta i L}{V_a - V_s} \quad (2.13)$$

La intención de calcular los tiempos de encendido y de apagado del interruptor estático radica en que para realizar el cálculo de los componentes pasivos se recomienda como primer paso proponer la frecuencia de conmutación después estimar los rizados de voltaje y corriente a la necesidad del circuito de carga. De igual forma que la anterior se supone un valor del condensador grande que permita mantener despreciable el rizo del voltaje de salida V_a

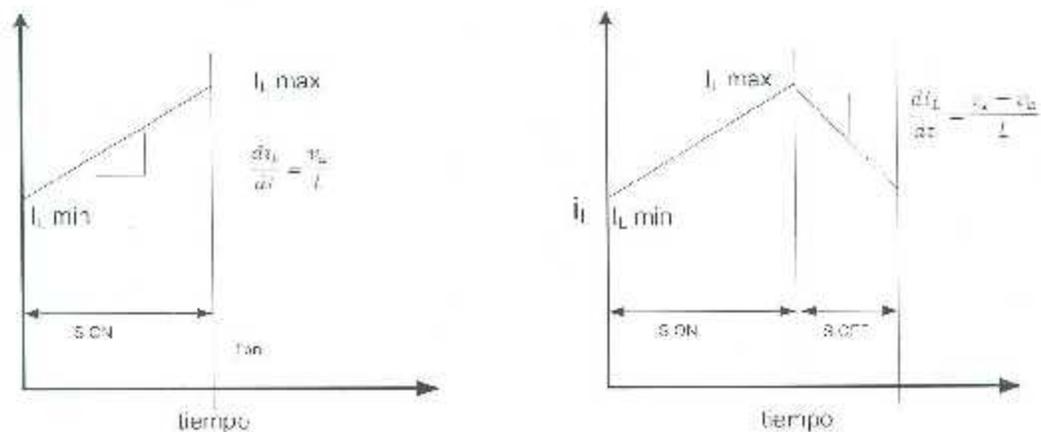


Figura 2.7 Comportamiento de la corriente en el inductor vs tiempo.

2.2.3 Pulsador reductor-elevador

Este regulador es capaz de suministrar una tensión de salida que puede ser menor o mayor que la tensión de entrada, figura 2.8. La polaridad de la tensión de salida es opuesta a la tensión de entrada, por esto también se conoce como regulador inversor. La operación de igual forma se puede describir en 2 tiempos. En el tiempo 1 comienza el interruptor estático activado y el diodo tiene polarización inversa. La corriente de entrada se eleva y fluye a través del inductor y del transistor, figura 2.9a. Cuando el tiempo 2 arranca, el interruptor estático se desactiva y la corriente que fluía a través del interruptor e inductor, ahora fluirá a través del inductor, del capacitor, del diodo y la carga. La energía que estaba almacenada en el inductor se transferirá a la carga y la corriente del inductor se abatirá hasta que el elemento interruptor estático vuelva a activarse en el próximo ciclo, figura 2.9b. De igual forma que los análisis anteriores suponemos que la corriente del inductor se eleva linealmente, por lo que la ecuación queda como se muestra en (2.14)

$$V_s = L \frac{I_2 - I_1}{t_1} = L \frac{\Delta I}{t_1} \quad (2.14)$$

Si despejamos t_1 para obtener el tiempo de encendido

$$t_1 = \frac{\Delta I L}{V_s} \quad (2.15)$$

Considerando que la corriente del inductor se abate linealmente también en el tiempo 2

$$V_s = -L \frac{\Delta I}{t_2} \quad (2.16)$$

Despejando t_2 para obtener el tiempo de apagado

$$t_2 = \frac{-\Delta I L}{V_s} \quad (2.17)$$

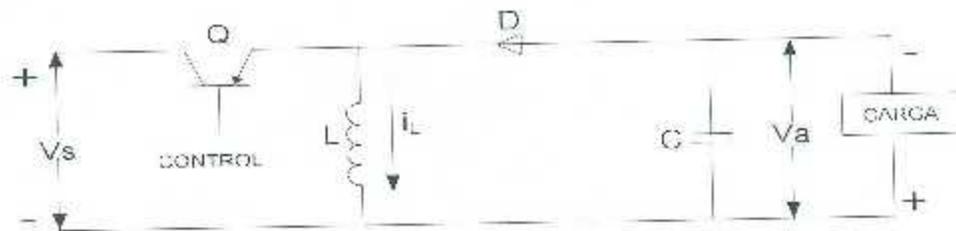


Figura 2.8 Diagrama eléctrico del pulsador reductor-elevador.

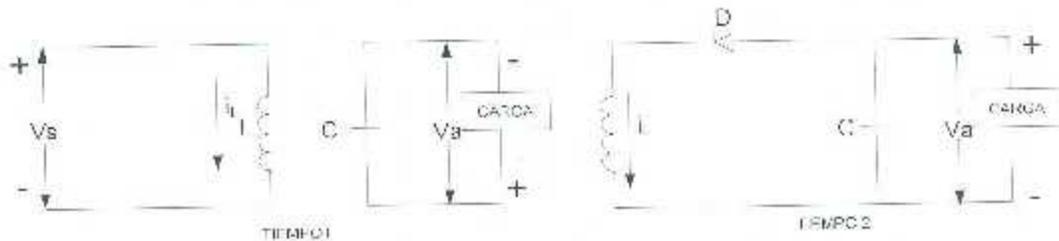


Figura 2.9 Circuito equivalente del pulsador reductor-elevador, a) funcionando en tiempo 1, b) funcionando en tiempo 2

Considerando que la componente ondulatoria del efecto de rizado es denotado por ΔI

$$\Delta I = \frac{V_s t_1}{L} = \frac{-V_a t_2}{L} \quad (2.18)$$

Si sustituimos $t_1 = kT$

Y $t_2 = (1 - k)T$

El voltaje promedio quedaria,

$$V_a = -\frac{V_s k}{1-k} \quad (2.19)$$

Si se supone un circuito sin pérdidas, la corriente de entrada seria igual a la corriente de la carga.

$$I_s = \frac{I_a k}{1-k} \quad (2.20)$$

El periodo de conmutación se puede calcular de la siguiente forma

$$T = \frac{\Delta I}{f} = t_1 + t_2 = \frac{\Delta I L}{V_s} - \frac{\Delta I L}{V_a} = \frac{\Delta I L (V_a - V_s)}{V_a V_s} \quad (2.21)$$

Con esto se puede obtener la componente ondulatoria pico a pico

$$\Delta I = \frac{V_a V_s}{fL(V_a - V_s)} \quad (2.22)$$

Cuando el interruptor está activo el capacitor proporciona la corriente de carga durante $t=t_1$. La corriente promedio de descarga del capacitor es $I_c = I_a$ y la tensión de la componente ondulatoria de pico a pico es

$$\Delta V_c = \frac{1}{C} \int_0^{t_1} I_c dt = \frac{1}{C} \int_0^{t_1} I_a dt = \frac{I_a t_1}{C} \quad (2.23)$$

Con la ec (2.23) es posible calcular el valor del condensador, planteando el margen de rizo aceptable en V_a ,

$$\Delta V_c = \frac{I_a V_a}{(V_a - V_s) f C} \quad (2.24)$$

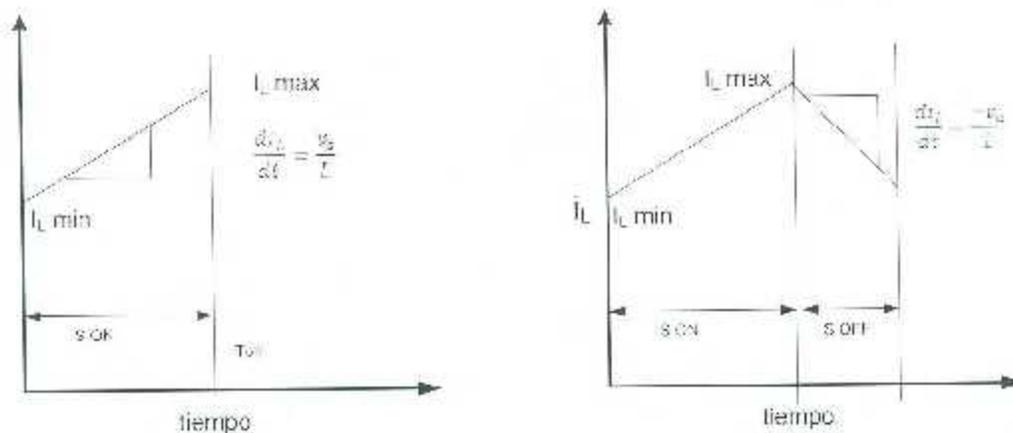


Figura 2.10 Comportamiento de la corriente en el inductor vs tiempo.

2.2.4 Pulsador Cúk

Llamado así en tributo a su inventor, el convertidor cúk se muestra en la figura 2.11. Parecido al pulsador reductor-elevador proporciona un voltaje de salida regulado por polaridad negativa respecto a la terminal común del voltaje de entrada. En este pulsador el capacitor C_1 es el medio principal para almacenar y transferir energía de la entrada a la salida. En estado permanente, los voltajes promedio de los inductores es cero. Por lo tanto

$$V_{c1} = v_s + v_a$$

$$\frac{V_a}{V_s} = \frac{D}{1-D}$$

Cuando el interruptor está apagado, las corrientes de los inductores fluyen a través del diodo. El circuito se muestra en la figura 2.11 el capacitor C_1 se carga por medio del diodo con energía tanto de la entrada como de L_1 . La corriente i_{L1} disminuye porque V_{c1} es más grande que v_a . La energía acumulada en L_2 alimenta la salida. Por tanto i_{L2} también disminuye.

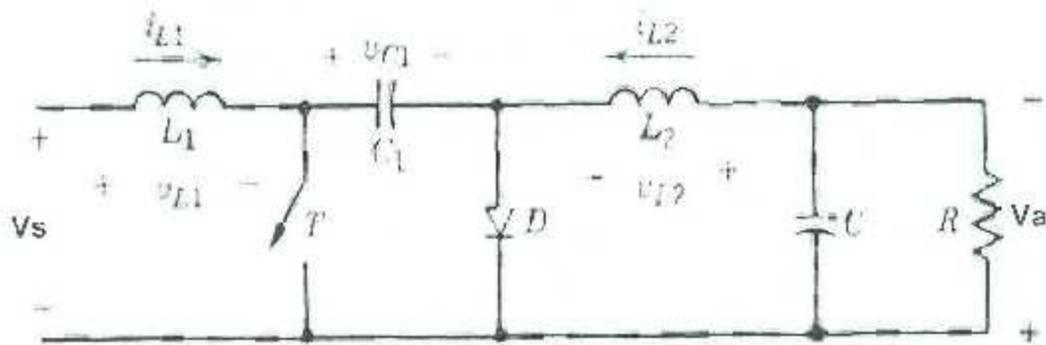


Figura 2.11 Circuito Eléctrico del convertidor Cúk

Cuando el interruptor está encendido, V_{c1} pone al diodo en polarización inversa. Las corrientes de los inductores fluyen a través del interruptor. Como $V_{c1} > V_o$, C_1 descarga a través del interruptor, transfiriendo energía a la salida L_2 . i_{L2} aumenta. La entrada alimenta energía a L_1 y causa que i_{L1} aumente.

2.2.5 Comparación de convertidores de CC-CC

Los convertidores reductores, elevadores, reductor elevador y Cúk en su forma básica son capaces de transferir energía solo en un sentido, esto como consecuencia de su capacidad de producir solamente un voltaje unidireccional y una corriente unidireccional. Para evaluar

la eficiencia de uso del interruptor en los circuitos de convertidores que se analizaron, se harán las siguientes suposiciones:

1. La corriente media está en su valor nominal (el máximo designado) I_a . La ondulación o rizo en la corriente del inductor es despreciable.
2. El voltaje de salida v_a está en su valor nominal. Se supone que la ondulación en v_a es despreciable.
3. Se permite que varíe el voltaje de entrada V_s . Por tanto la relación de trabajo del interruptor debe controlarse para mantener V_a constante.

Con estas condiciones de operación de estado permanente se calculan el voltaje nominal de pico V_T del interruptor y la corriente nominal de pico I_T . La potencia nominal del interruptor P_T se calcula $P_T = V_T I_T$. La utilización del interruptor se expresa como $\frac{P_o}{P_T}$ donde $P_o = V_a I_a$ es la potencia nominal de salida.

El factor de utilización del interruptor $\frac{P_o}{P_T}$ se traza para los convertidores analizados. Esto demuestra que en los convertidores reductores y elevadores si los voltajes de entrada y salida son de la misma orden de magnitud, la utilización del interruptor es muy buena. En el convertidor elevador-reductor y Cúk la utilización del interruptor es muy deficiente. Donde la máxima utilización del interruptor es de 0.25 [10]

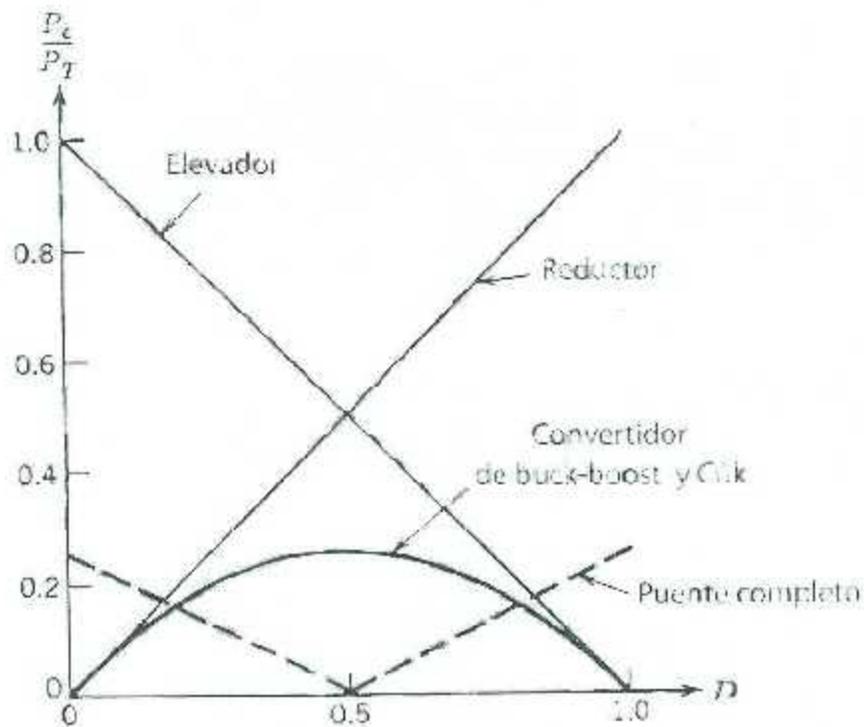


Figura 2.12 Gráfica de la comparación de eficiencias en las diferentes topologías de convertidores.

En la gráfica 2.12 se puede observar que tanto el convertidor elevador como el reductor pueden ofrecer la potencia de salida igual a la potencia de entrada, lo que genera que la potencia de salida solo esté limitada por la potencia máxima del interruptor estático. Analizando la gráfica de la figura 2.12 el convertidor reductor-elevador y el Cuk tienen un factor de utilización máximo del interruptor del 25%, por lo que la potencia de salida se vería disminuida sobre la potencia de entrada y obligaría a tener un sobredimensionamiento en el diseño.

2.3 Convertidores Estáticos CD-CA monofásicos.

El convertidor cd-ca es un dispositivo electrónico conocido como inversor que transforma una fuente de corriente directa (cd) en una señal de salida de tensión y corriente alterna (ca), cuya amplitud y frecuencia puede ser modificada de acuerdo a las técnicas de conmutación y control de disparo de los interruptores estáticos.

Basicamente se desarrollan dos tipos de inversores llamados inversores de fuente de tensión (VSI-voltage source inverter) e inversores de fuente de corriente (CSI-current source inverter). Los inversores VSI emplean la señal de tensión de una fuente de CD para convertirla en tensión de CA y la corriente de salida de este inversor está en función de la demanda de la carga alimentada. Por otro lado, el inversor CSI requiere de la inyección de corriente de la fuente de CD para transformarla en CA, por lo que la carga alimentada debe soportar la corriente inyectada; las aplicaciones van enfocadas a motores eléctricos de gran potencia.

Un inversor ideal sería aquel que presentara una forma de onda de voltaje sinusoidal. Sin embargo, esto no es posible. El campo de trabajo de los inversores se encuentra en gran proporción en aplicaciones industriales como la propulsión de motores de ca de velocidad variable, calefacción por inducción y fuentes de respláco entre otras. Las fuentes de alimentación hacia el inversor pueden ser baterías ya sea en presentación única o en un arreglo serie o paralelo, un arreglo de celdas solares u otra fuente de cd, [11], en donde se pueden emplear convertidores CD-CD para adecuar la tensión o corriente, dependiendo del tipo de inversor, VSI o CSI, respectivamente.

En general, los inversores son dispositivos que se pueden diseñar para proporcionar cualquier número N de fases, con señales de salida a cualquier frecuencia deseada. Basta simplemente con elaborar las N ramas de pares de interruptores estáticos para obtener las N fases, y los $2N$ canales de activación de los interruptores deben adecuarse para la obtención de los desfases de señales de CA y con la frecuencia deseada. Comúnmente a nivel residencial e industrial es posible encontrarse con inversores monofásicos y trifásicos, pero también existen aplicaciones especiales de 5 o 6 fases aplicados a motores eléctricos.

El tipo de inversor que se trata en este trabajo es del tipo VSI monofásico, dado que se trata de un sistema de generación en modo isla y la carga es un motor monofásico de baja potencia, por lo que la fuente de entrada será tensión de CD.

2.3.1 Inversores monofásicos de medio puente

El principio básico de funcionamiento de un inversor monofásico puede entenderse empleando una rama con 2 transistores conmutados alternadamente en tiempos fijos. Como se puede ver en la figura 2.13, se tiene que evitar conmutar un transistor cuando el otro este activo ya que esto ocasionaría un corto circuito en la etapa de la fuente de CD.

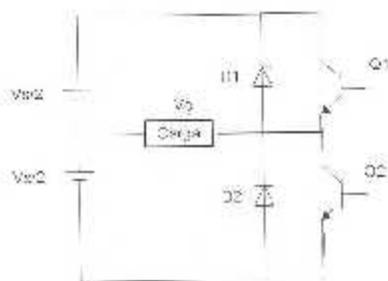


Figura 2.13 Circuito Inversor de medio puente

Una característica de este tipo de inversor es la existencia de dos fuentes de CD, o bien, la existencia de una conexión intermedia entre la rama del inversor. Esta conexión intermedia se puede obtener con la aplicación de una sola fuente de tensión de CD y la conexión de dos capacitores en serie entre la rama del inversor, de esta manera la conexión intermedia se toma como un punto de conexión del inversor.

Si se considera la activación alternada de los dispositivos Q_1 y Q_2 del convertidor, se tiene que al activar Q_1 (Q_2 está desactivado), la alimentación de la carga proviene de la fuente $V_s/2$ por lo que el sentido de corriente sale de $V_s/2$, atraviesa Q_1 y después llega a la carga, figura 2.13. Cuando se da la conmutación, ahora Q_2 se activa (Q_1 está desactivado), la fuente $V_s/2$ alimenta la carga, donde el sentido de corriente va de $V_s/2$ atravesando a la carga y después a Q_2 , figura 2.14. De esta manera la tensión y la corriente en la carga presenta el perfil de la conmutación de los interruptores estáticos del inversor, figura 2.8 c).

El voltaje rms de salida del inversor, considerando el perfil de conmutación, se puede calcular de la siguiente forma.

$$V_o = \left(\frac{2}{T_0} \int_0^{T_0/2} \frac{V_s^2}{4} dt \right)^{1/2} = \frac{V_s}{2} \quad (2.25)$$

Donde T_0 es el periodo, V_o la tensión de salida y V_s la tensión de alimentación. Al establecer que la forma de onda de la salida del inversor está en función de la conmutación de los interruptores, es posible modificar el esquema de conmutación para emular la onda sinusoidal que idealmente se quiere en un inversor.

2.3.2 Inversores monofásicos en puente completo

Este inversor consiste de dos ramas de interruptores estáticos, o de dos inversores de medio puente, pero sin la necesidad de conectar un punto intermedio, ya que las dos ramas proveen las terminales para conectar la carga monofásica. También solo es necesario contar con una sola fuente de CD, figura 2.14.

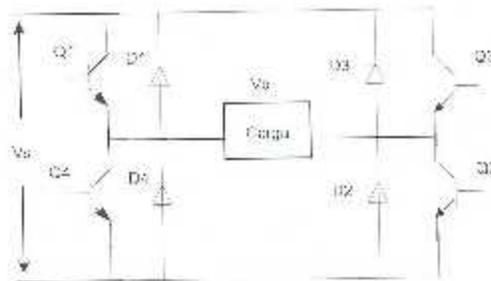


Figura 2.14 Inversor monofásico de puente completo

Al utilizar una sola fuente de CD, V_s , y cuatro interruptores estáticos dispuestos en la conexión mostrada en la fig. 2.14, la tensión máxima que recibe la carga es la de la fuente de CD, que a diferencia del inversor de medio puente, la carga solo recibe la mitad de la tensión de la fuente de CD. Esto implica que para la misma carga, la potencia, la tensión y la corriente son mayores que en el inversor de medio puente.

La lógica de conmutación de este inversor es similar al inversor de medio puente, en donde la conmutación se da por ramas, por lo que al activarse Q1 debe desactivarse Q4, y lo mismo para la otra rama, en donde al activarse Q3 debe desactivarse Q2. Por tanto, la lógica de pulsos entre las ramas Q1-Q4 y Q3-Q2 se separan 180° entre sí para lograr la

condición de coincidencia de activación entre los elementos Q1-Q2, y desactivación de los elementos Q3-Q4, asegurando así la alimentación de la carga con un sentido de corriente, figura 2.15 a) y c). Cuando no existe la condición de coincidencia de activación de interruptores estáticos cruzados (Q1 con Q4 o Q2 con Q3), los diodos presentes permiten la recuperación de energía al permitir la circulación de corriente, también permiten la fácil desactivación de los interruptores estáticos y la consiguiente protección de los interruptores estáticos por desconexión de carga inductiva, figura 2.16 b) y d). Esta última condición se obtiene generalmente cuando se utilizan técnicas de conmutación avanzadas.

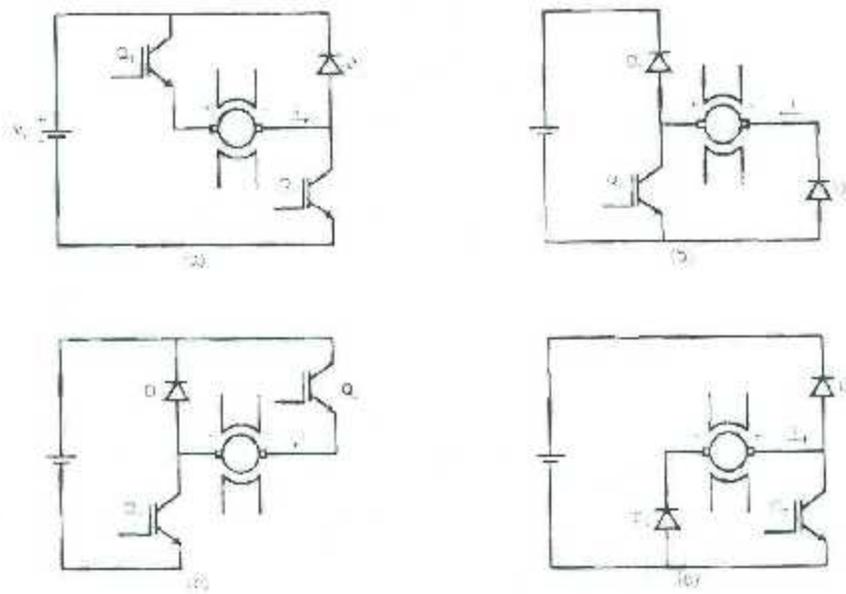


Figura 2.15 Conmutación de los transistores en los diferentes tiempos.

Considerando que la técnica de conmutación es por pulsos sostenidos u onda cuadrada, la tensión que recibe la carga es de perfil cuadrado y alterno. Por tanto, la tensión RMS que recibe la carga es:

$$V_o = \left(\frac{2}{T_0} \int_0^{T_0/2} V_s^2 dt \right)^{1/2} = V_s \quad (2.26)$$

Donde T_0 es el periodo, V_o la tensión de salida y V_s la tensión de alimentación

Reconociendo que el voltaje de salida del inversor no será una onda sinusoidal perfecta y contendrá componentes de voltaje en frecuencias armónicas. Se puede calcular el V_0 a las diferentes componentes:

El voltaje instantáneo de salida se expresa en una serie de Fourier como:

$$V_0 = \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{4V_s}{n\pi} \sin n\omega t \quad (2.27)$$

Con la siguiente ecuación es posible calcular la tensión en la componente fundamental donde se encuentra un valor rms de:

$$V_1 = \frac{4V_s}{\pi} = 0.90V_s \quad (2.28)$$

2.4 Tipos de modulación de ancho de pulso.

En gran cantidad de aplicaciones industriales es necesario controlar el voltaje de salida de los inversores para hacer frente a las variaciones de entrada de cd, para la regulación de voltaje en los inversores y para los requisitos de control constante del voltaje y la frecuencia [9]. Existen varias técnicas para variar la ganancia del inversor. Un método eficiente para controlar el voltaje de salida es incorporar en los inversores el control de modulación por ancho de pulso (PWM) [9]. Las técnicas comúnmente utilizadas son:

1. Modulación de un solo ancho de pulso.
2. Modulación de varios anchos de pulso
3. Modulación sinusoidal del ancho de pulso

2.4.1 Modulación de un solo ancho de pulso.

Cuenta con un solo pulso por cada medio ciclo donde el ancho de pulso se puede variar mediante el ángulo δ , con la finalidad de controlar el voltaje de salida del inversor. En la figura 2.16 se pueden apreciar que los pulsos de salida tienen que presentar la misma

amplitud pero con la diferencia que uno tiene una tensión positiva y el otro una tensión negativa

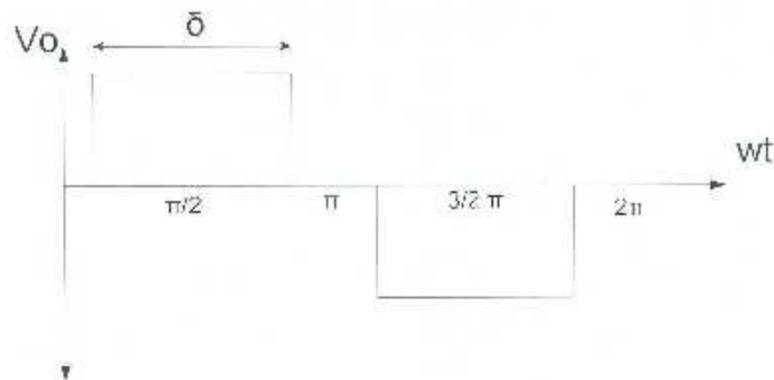


Figura 2.16 Modulación por un solo ancho de pulso

El voltaje rms de salida del inversor se determina como:

$$V_o = \left[\frac{2}{2\pi} \int_{\frac{\pi-\delta}{2}}^{\frac{\pi+\delta}{2}} V_s^2 d(\omega t) \right]^{1/2} = V_s \sqrt{\frac{\delta}{\pi}} \quad (2.29)$$

2.4.2 Modulación de varios anchos de pulso.

Se utilizan varios pulsos en cada medio ciclo de voltaje de salida. Con esta técnica se reduce el contenido armónico en comparación con la de un solo ancho de pulso. Consta de una señal de referencia la cual es un escalón bipolar, y una señal portadora que es una triangular figura 2.17. La frecuencia de la señal de referencia determinará la frecuencia del voltaje a la salida del inversor. Y la frecuencia de la portadora determinará el número de pulsos por cada ciclo, figura 2.18. También es conocida como modulación uniforme de ancho de pulso (UPWM).

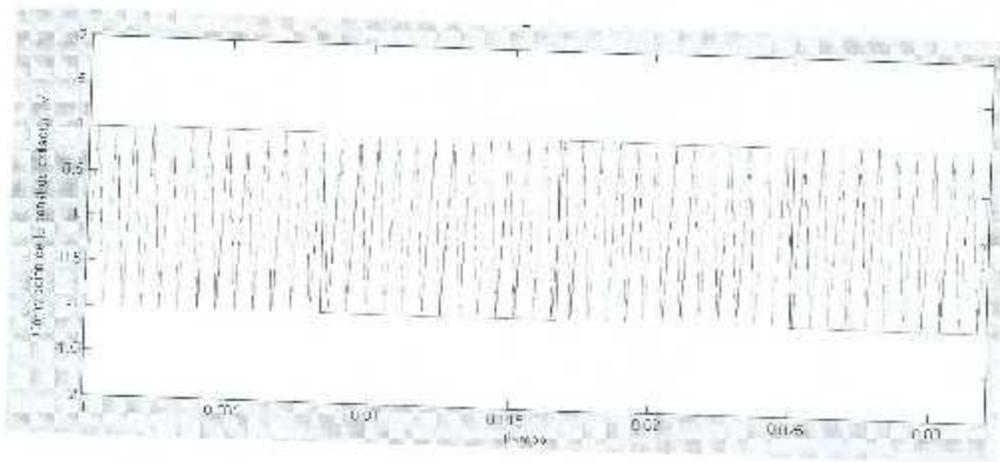


Figura 2.17 Modulación por varios pulsos uniformes

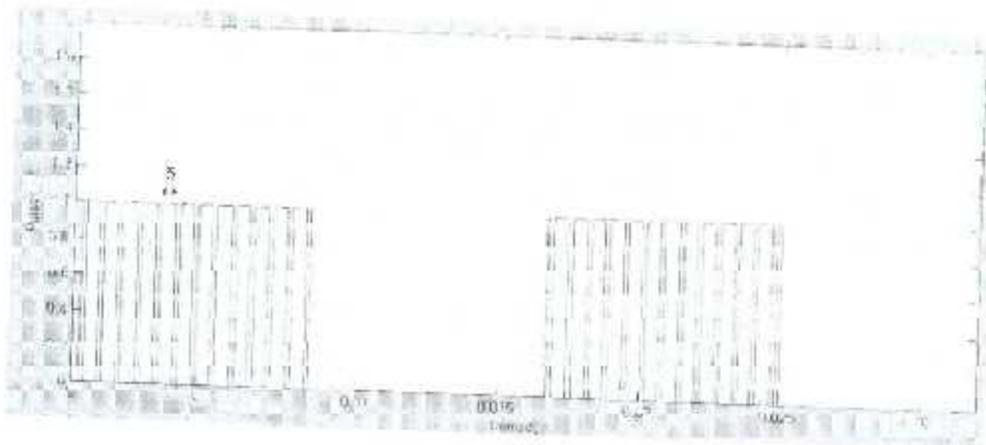


Figura 2.18 Generación de pulsos uniformes

El número de pulsos por cada ciclo se determina por:

$$p = \frac{f_c}{2f_r} = \frac{m_f}{2} \quad (2.30)$$

Donde p es el número de pulsos por cada ciclo, f_c frecuencia de la señal portadora, f_r frecuencia de la señal de referencia, y m_f es la relación de modulación de frecuencia $\frac{f_c}{f_r}$.

El voltaje de salida para los inversores monofásicos en puente, se puede calcular

$$V_o = \left[\frac{2p}{2\pi} \int_{(\frac{\pi}{p} - \delta)/2}^{(\frac{\pi}{p} + \delta)/2} V_s^2 d(\omega t) \right]^{1/2} = V_s \sqrt{\frac{p\delta}{\pi}} \quad (2.31)$$

Donde δ es el tiempo de duración de cada pulso.

2.4.3 Modulación sinusoidal del ancho de pulso

Consiste en la comparación de dos señales, una portadora y una señal de referencia, figura 2.19. La señal de referencia es una onda sinusoidal la cual tendrá la frecuencia de salida del inversor. La señal portadora es una señal triangular y el número de pulsos por medio ciclo depende directamente de la frecuencia de esta señal. El voltaje rms a la salida puede controlarse si se varía el índice de modulación. El factor de distorsión y las armónicas de menor orden se reducen en forma significativa. Este tipo de modulación ocupa gran porcentaje en los inversores industriales. En la actualidad es el método más utilizado en inversores [13].

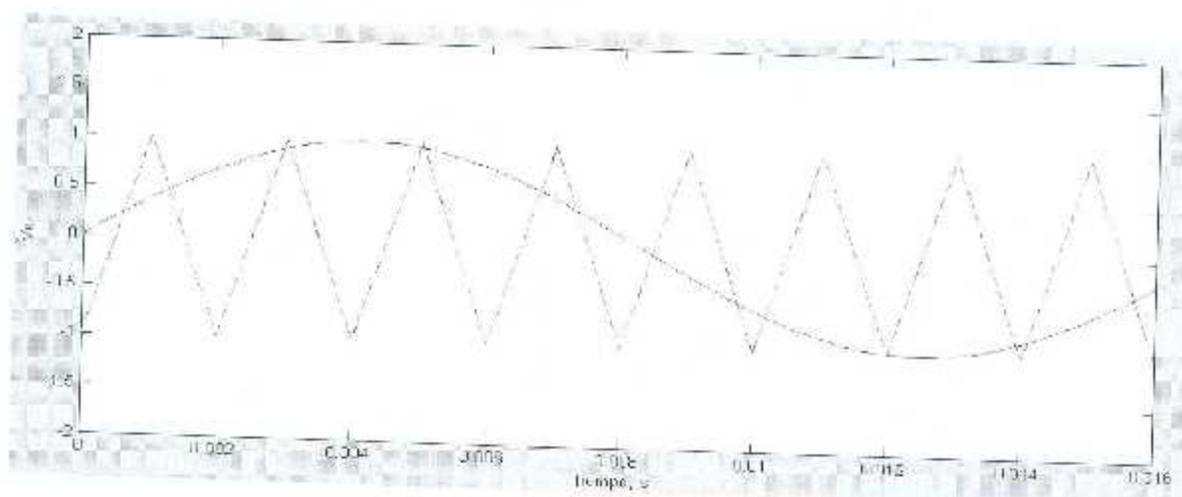


Figura 2.19 Modulación sinusoidal de ancho de pulso.

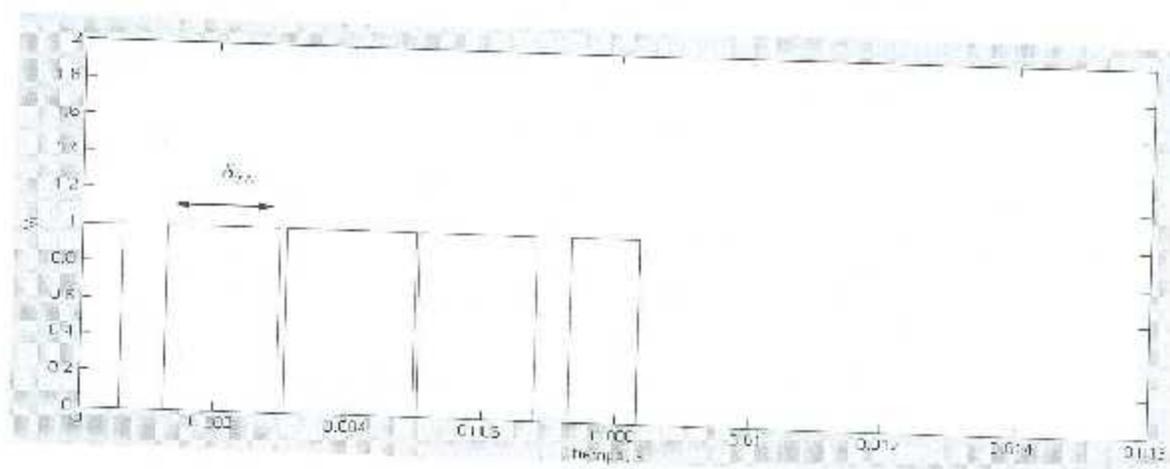


Figura 2.20 Generación de pulsos por Modulación sinusoidal de ancho de pulso (SPWM).

Un inversor de modulación por ancho de pulso sinusoidal SPWM presenta grandes ventajas sobre otros tipos de inversores, entre las que se pueden mencionar tiene una alta eficiencia en todos los tipos de carga, presenta una baja generación de armónicos, requiere de un control flexible y bajos recursos de cómputo [14].

Para el cálculo de voltaje rms de salida

$$V_o = V_s \left(\sum_{m=1}^n \frac{\delta_m}{\pi} \right)^{1/2} \quad (2.32)$$

Donde δ_m es el tiempo de duración de cada pulso, δ_m será diferente para cada pulso.

El voltaje de salida de los inversores contiene armónicas. La frecuencia de la señal portadora empuja las armónicas al rango de las altas frecuencias alrededor del valor de conmutación f_c y sus múltiplos, alrededor de las armónicas m_f , $2m_f$, $3m_f$ y así sucesivamente, m_f es la relación de modulación de frecuencia $\frac{f_s}{f_o}$.

Se recomienda una frecuencia alta para la señal triangular ya que entre más pulsos por medio ciclo se presenten, el voltaje de salida se acercará a una onda sinusoidal.

2.4.3.1 Simulación de la modulación sinusoidal del ancho de pulso

Para llevar a cabo la simulación se utilizó MATLAB-SIMULINK, figura 2.21. La señal de referencia sinusoidal tiene una amplitud de 1 y una frecuencia de 60 Hz y la señal portadora es una señal triangular con una amplitud de 1 y una frecuencia de 1.5 KHz. La configuración de estas señales se alcanza a apreciar en las figuras 2.23a y 2.23b.

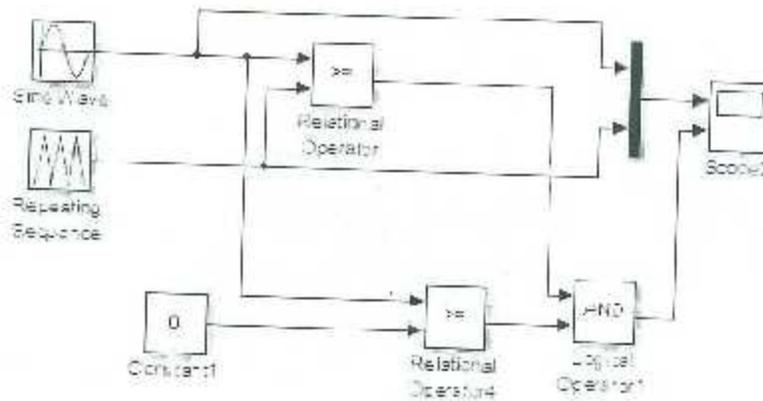


Figura 2.21 Modelación en MATLAB_SIMULINK

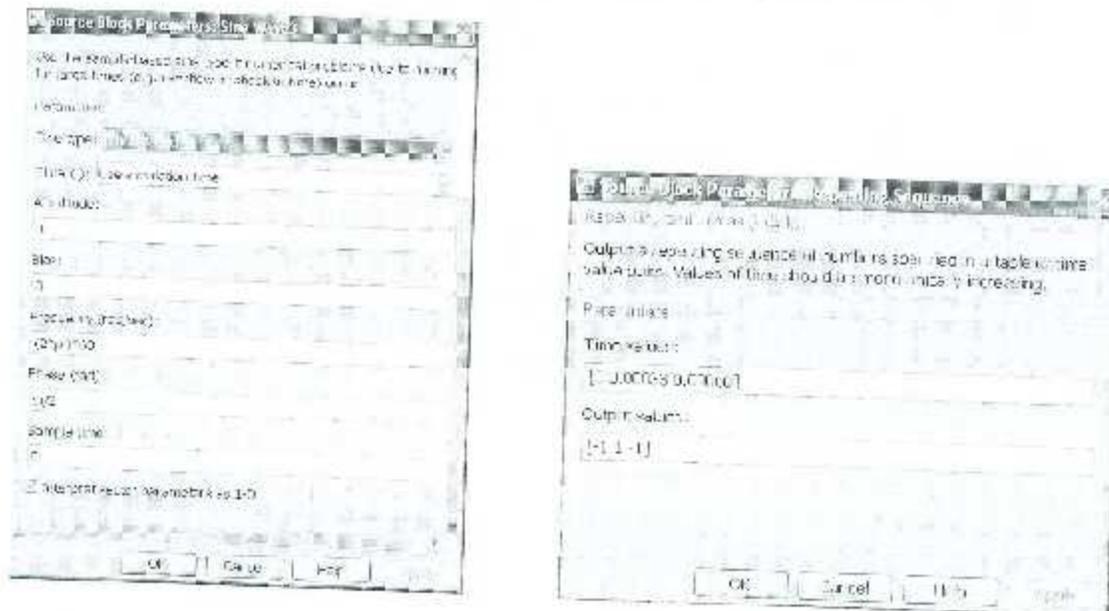


Figura 2.22 Parámetros de Matlab-Simulink, a) Parámetros Señal sinusoidal(Izquierda), b) Parámetros señal triangular(Derecha).

La figura 2.23 se muestra la señal moduladora y portadora, las cuales, por comparación permite obtener los pulsos que activarán los dispositivos del convertidor, La figura 2.24 es el resultado de la comparación, que de acuerdo a la lógica que se siga, es fácil observa que el área de cada pulso corresponde aproximadamente al área bajo la onda sinusoidal.

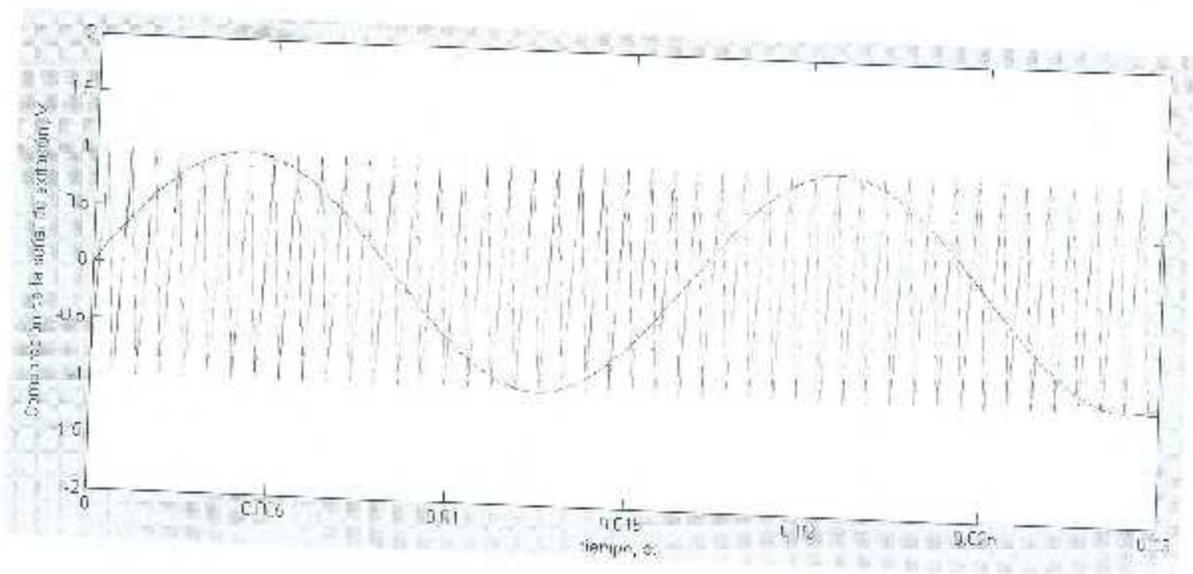


Figura 2.23 Señal portadora (triangular) y señal de referencia (sinusoidal)

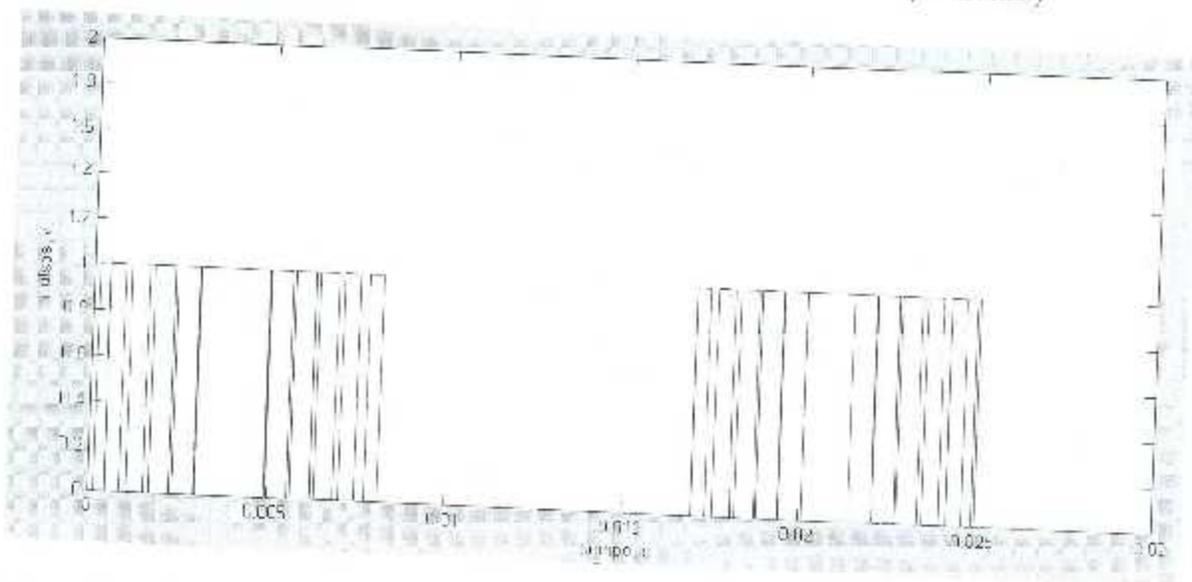


Figura 2.24 Pulsos a los dispositivos de conmutación de una pierna del inversor de puente completo

Para determinar la eficiencia de un inversor μ_c , una forma rápida y sencilla sería la siguiente:

$$\mu_c = \frac{P_{ac}}{P_{dc}} \times 100 \% \quad (2.35)$$

Donde P_{ac} es la potencia a la salida del inversor y P_{dc} es la potencia de dc a la entrada [16].

Capítulo 3

Máquina de inducción monofásica y bifásica.

3.1 Introducción.

Actualmente, gran parte de los motores de inducción de capacidad fraccionaria está conformada por motores monofásicos [17], los cuales son ampliamente utilizados en aplicaciones residenciales y comerciales, tales como electrodomésticos conformados por refrigeradores, lavadoras, secadoras, además de ventiladores, aire lavado y acondicionado, equipo hidroneumático y bombeo de fluidos, entre otros. El principio de operación del motor monofásico se basa principalmente en el motor bifásico, [17], debido a que un motor absolutamente monofásico no tiene la capacidad de direccionar una resultante magnética para obtener un par de giro en un sentido controlado, es decir, no presenta momento de arranque. Por ello, al motor monofásico se le puede asociar a la teoría de los motores bifásicos considerando devanados asimétricos, debido a que la generación de los dos flujos magnéticos en el motor se obtienen por dos medios que producen diferentes intensidades de campo magnéticos, asociándose así a dos bobinas con diferentes características. En algunos motores monofásicos, esta característica bifásica llega a estar de forma permanente, y en algunos otros solo se presenta durante el periodo de arranque del motor. Por tanto, en este capítulo se tratarán las teorías de los motores monofásico y bifásico para comprender el funcionamiento básico, de tal manera que sea aplicable a la variación de velocidad de este trabajo de tesis.

3.2 Teoría del Motor Monofásicos de Inducción

El motor monofásico de inducción es alimentado por un sistema de una sola fase, por lo que se puede asociar que el campo magnético de este motor solamente se direcciona sobre un solo eje magnético, figura 3.1, careciendo entonces de un campo magnético rotativo. En esencia, el campo magnético del estator del motor solamente generará un efecto de cabeceo o vibraciones en el rotor, dado que no se produce un momento de arranque en una sola dirección que sea de suficiente magnitud para iniciar el movimiento rotativo; la aplicación manual de par en la flecha del motor monofásico llega a ser suficiente para hacerlo arrancar en cualquiera de los dos sentidos y tener así un momento inducido. Debido a esto, se hizo necesario desarrollar métodos para iniciar el giro del motor, con lo que se abre paso a las dos teorías básicas que aplican al motor de inducción, la teoría del doble campo giratorio y la teoría del campo cruzado.

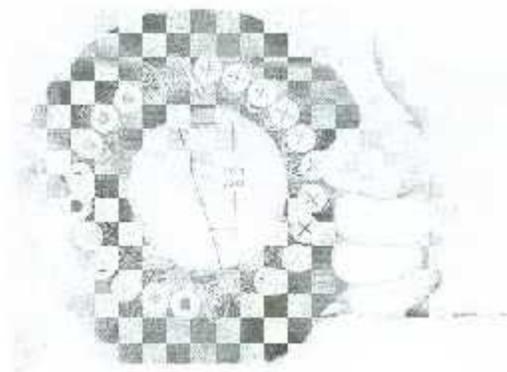


Figura 3.1 Eje magnético producido por el estator monofásico

3.2.1 Teoría de doble campo giratorio y de campo cruzado en motores monofásicos.

Esta teoría establece que un campo magnético estacionario pulsante y dirigido sobre el eje magnético del estator se puede descomponer en dos campos magnéticos rotativos de igual

magnitud pero moviéndose en direcciones opuestas. El motor de inducción responde a ambos campos magnéticos por separado y el par resultante en la máquina será la suma de los pares debidos a cada uno de los campos magnéticos, [18].

Por lo tanto, considerando que el campo magnético pulsante, estacionario y dirigido sobre el eje magnético \hat{q} del estator presenta una densidad de flujo denotado por:

$$B_{\text{estator}}(t) = (B_{\text{max}} \cos \omega t) \hat{q} \quad (3.1)$$

Se puede establecer la descomposición de este vector estacionario en dos vectores giratorios con movimiento en direcciones opuestas, siendo la ec. (3.2a) en el sentido horario y (3.2b) en el sentido antihorario:

$$B_h(t) = \left(\frac{1}{2} B_{\text{max}} \cos \omega t\right) \hat{q} - \left(\frac{1}{2} B_{\text{max}} \sin \omega t\right) \hat{d} \quad (3.2a)$$

$$B_{ah}(t) = \left(\frac{1}{2} B_{\text{max}} \cos \omega t\right) \hat{q} + \left(\frac{1}{2} B_{\text{max}} \sin \omega t\right) \hat{d} \quad (3.2b)$$

Al sumar los campos contrarios giratorios se obtiene el campo magnético pulsante, estacionario y dirigido sobre el eje magnético \hat{q} de estator:

$$B_{\text{estator}}(t) = B_h(t) + B_{ah}(t) \quad (3.3)$$

Revisando las ecuaciones establecidas en esta teoría se puede observar que la suma de los dos campos magnéticos presenta una magnitud únicamente sobre el eje q del plano establecido en el motor. El par inducido neto en el motor es la diferencia entre las dos curvas par-velocidad como se muestra en la fig. 3.2, nótese que a velocidad cero no hay par neto, por lo que no será posible la puesta en marcha del motor. Analizando por separado la ec. (3.2) y (3.3) es posible establecer que cada densidad de flujo conforma un semicírculo en oposición, por lo que tratar de establecer un comportamiento del par electromagnético dependerá principalmente de las acciones que ocurran en el rotor: estableciendo una resultante de campo magnético dirigido hacia el eje d o aplicando una fuerza o par externo a la flecha del rotor para establecer el movimiento. Si el motor fuera arrancado por medios

auxiliares, produciría un par en la dirección en que fue direccionado el movimiento auxiliar.

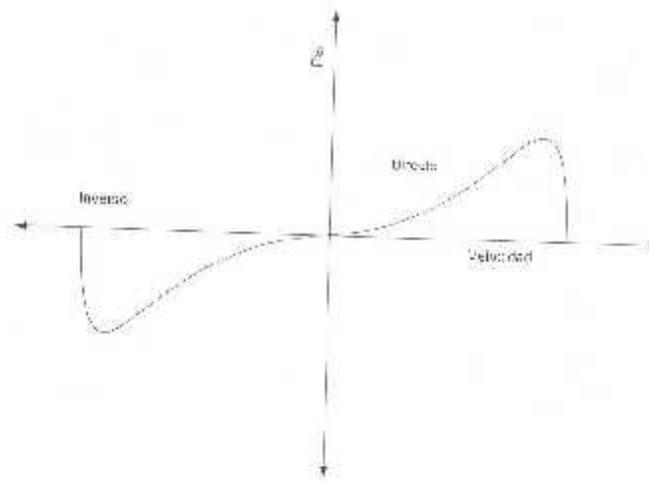


Figura 3.2 Representación del doble campo giratorio

Por otro lado se encuentra la teoría del campo cruzado, la cual considera la interacción del rotor con el estator, cuando el fenómeno de inducción electromagnética es establecido por la alimentación del estator y produce movimiento. En este sentido, la inducción del estator sobre el rotor en movimiento produce corrientes en el circuito, generándose así el campo magnético en el rotor, el cual, de acuerdo a [19], se asegura que en las barras del rotor se inducen voltajes cuyo valor pico ocurre en los devanados que pasan directamente bajo los devanados del estator. Los voltajes inducidos en el rotor producen un flujo de corriente que debido a la alta reactancia del mismo rotor se presenta un desfase cercano a los 90° entre la tensión inducida y la corriente del rotor. El campo magnético inducido en el rotor en movimiento es de menor intensidad que en el estator debido a las pérdidas que existen. La inducción de campo magnético en el rotor, denotado por B_{Rotor} , establece el acoplamiento magnético con el estator mediante $B_{Estator}$, por lo que, el par electromagnético inducido se da por el producto cruz entre ambas resultantes magnéticas

$$\tau_{elect} = k B_{Estator} \times B_{Rotor} \quad (3.4)$$

Por tanto, cuando se asume un motor absolutamente monofásico, es decir, que solo cuenta con una bobina en estator, el flujo magnético inducido en el rotor detenido se encuentra alineado con el flujo magnético del estator pero en sentido contrario, por lo que el par electromagnético inducido promedio presenta un valor cero. Al establecerse el movimiento giratorio en el rotor, se presenta un desfaseamiento entre las resultantes magnéticas del estator y el rotor, por lo que el máximo par electromagnético inducido se obtiene a los 90° de desplazamiento.

3.2.2 Campo magnético rotatorio.

El principio de operación de una máquina rotativa de inducción de corriente alterna se basa en la obtención de un campo magnético giratorio en el estator para inducir un campo magnético en el circuito del rotor con la finalidad de que ambos campos magnéticos tiendan a alinearse, por lo que el rotor comienza una persecución para alcanzar al campo giratorio del estator. Este principio de operación se concibe con naturalidad en los motores de inducción trifásicos, dado que la disposición espacial de 120° de las bobinas de estator con la alimentación trifásica de la fuente que presenta corrientes desplazadas a 120° , se genera el campo magnético rotativo.

El campo magnético rotatorio en la máquina polifásica, es un campo magnético que gira idealmente a una velocidad uniforme y es generado a partir de una corriente eléctrica alterna polifásica. Su descubridor fue Galileo Ferraris en 1885, [20]. Considerando el estator trifásico de un motor y una alimentación trifásica de corriente, se tiene que:

$$i_a = I_m \cos \omega t \quad (3.5)$$

$$i_b = I_m \cos (\omega t - 120^\circ) \quad (3.6)$$

$$i_c = I_m \cos (\omega t + 120^\circ) \quad (3.7)$$

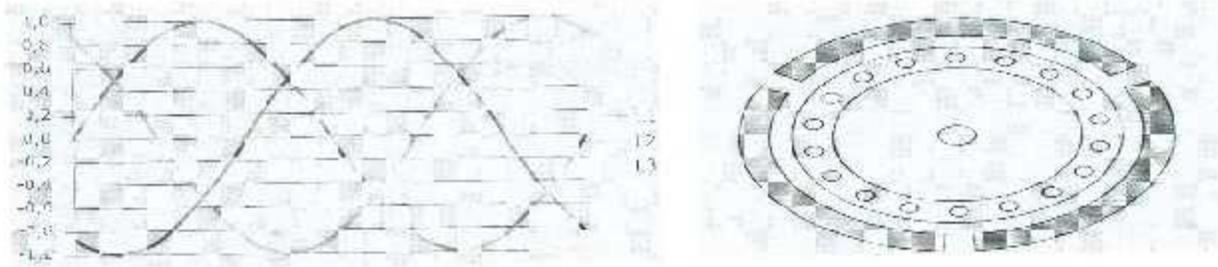


Figura 3.3 Desfasamiento de corrientes y posición de bobinas de un motor trifásico.

Como se ve las funciones son periódicas, si de igual manera se alimentan las tres bobinas del estator se producirá un campo magnético pulsante siguiendo el eje magnético de cada bobina. Esto da como resultado que en cada instante la intensidad de campo magnético producido por cada bobina varía. La intensidad del campo magnético será máxima cuando la corriente pase por su valor máximo, será mínima cuando sea cero, después de cruzar por cero cambiará de sentido y el campo magnético también sufrirá el cambio.

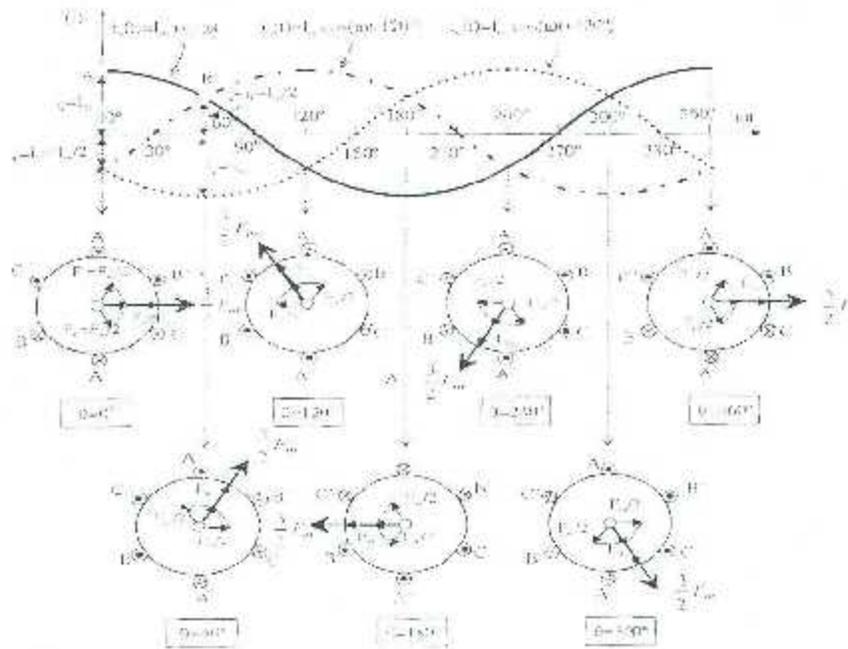


Figura 3.4 Obtención del campo magnético giratorio en un estator trifásico

El campo magnético giratorio producido en el estator inducirá una tensión en el rotor trifásico, por lo que también se produce una resultante magnética en el rotor y con ello la interacción de ambos campos magnéticos que originan el par electromagnético.

Considerando que el motor de inducción monofásico está compuesto solamente por una bobina en el estator y la alimentación de energía eléctrica se da por una fuente monofásica, la resultante magnética del estator está dirigida solamente sobre un eje magnético. Como ya se había afirmado, cuando el rotor se encuentra en movimiento, el campo magnético resultante en el rotor se desplaza con respecto al del estator un ángulo δ_m , obteniendo así el par electromagnético que origina el movimiento permanente en el motor.

Los motores de inducción monofásicos presentan una desventaja, debido a que solo tienen una sola fase en el devanado de estator. El campo magnético en un motor monofásico no gira, únicamente genera pulsaciones por lo que esta es la principal desventaja de este motor, ya que esta limitación no le permite poseer por sí solo un par de arranque. Puesto que no existe un campo magnético rotativo en el motor monofásico de inducción y con ello una carencia en el par de arranque, es necesario utilizar un elemento que genere una desviación o movimiento en la resultante del campo magnético con la finalidad de iniciar el giro en el rotor del motor. A partir de esto, se proponen diversos métodos de arranque de motores de inducción, colocándole bobinas auxiliares adicionales a la bobina principal o modificando las geometrías de los materiales ferromagnéticos de estator que transportan el flujo hacia el rotor.

3.2.3 Circuito equivalente del motor monofásico en estado estable.

En esta sección se revisan diferentes tipos de motor de inducción monofásico en funcionamiento de estado estable. Si se consideran las condiciones con el motor en estado estable y solo el devanado principal del estator excitado, el motor equivale a un transformador con su secundario en cortocircuito. El circuito se muestra en la fig. 3.5, donde para el circuito de estator r_p es la resistencia del devanado principal, L_{ip} y L_{mcp} son la

inductancia de dispersión e inductancia mutua. Para el circuito de rotor, L'_{lp} y r'_{rp} son la inductancia de dispersión y resistencia, referidas al devanado principal de estator.

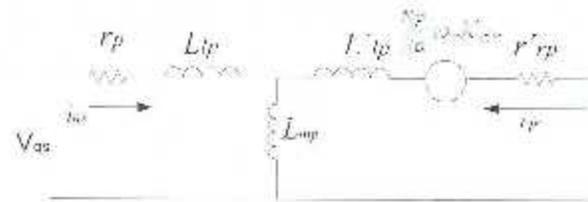


Figura 3.5 Circuito equivalente del motor monofásico en estado estable con rotor detenido.

Considerando el rotor en movimiento y estado estable, se supone la existencia de dos campos magnéticos en estator, ecuaciones (3.2a) y (3.2b); el campo directo que gira a la velocidad sincrónica y el campo inverso que gira al contrario de la velocidad sincrónica. Por otra parte, la resistencia efectiva del rotor del motor depende de la cantidad de movimiento relativo entre el campo magnético del rotor y el del estator. Por tanto, el campo magnético directo origina una diferencia de velocidades entre el rotor y el campo magnético dado por el deslizamiento s , por lo que la resistencia del rotor es $\frac{0.5r_r}{s}$. El campo magnético inverso gira contrario a la velocidad sincrónica y la diferencia total de velocidad en por unidad tomando como base la velocidad sincrónica entre ambos campos es 2. La diferencia total de velocidad en por unidad entre el rotor y el campo inverso es $2-s$, esto implica que la resistencia del rotor en la parte del campo magnético inverso sea $\frac{0.5r_r}{2-s}$. Buscando simplificar los cálculos se presentan las siguientes ecuaciones de impedancias equivalentes tanto del campo directo como del inverso.

$$Z_d = r_d + jx_d = \left(\frac{r_r}{s} + jx_{lp}\right) // jx_{mp} \quad (3.8)$$

$$Z_i = r_i + jx_i = \left(\frac{r_r}{2-s} + jx_{lp}\right) // jx_{mp} \quad (3.9)$$

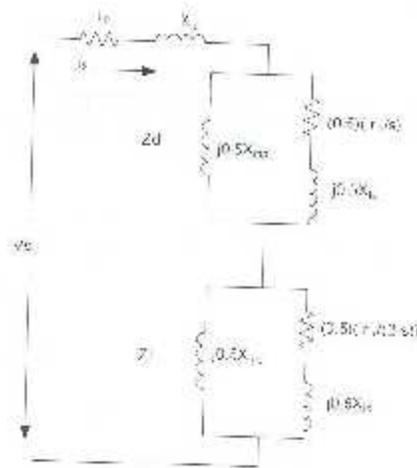


Figura 3.6 Circuito equivalente considerando campo directo y campo inverso

Ya con las equivalencias de las impedancias de campo directo e inverso, z_d y z_i , respectivamente, la corriente en el estator se calcula de la siguiente manera,

$$i_s = \frac{v_s}{r_p + jx_p + 0.5 z_d + 0.5 z_i} \quad (3.10)$$

3.2.3.1 Modelo del motor monofásico.

Para realizar el modelo del motor monofásico en MATLAB-SIMULINK se tomaron las siguientes ecuaciones de [5]. En la fig. 3.7 se muestra el circuito equivalente.

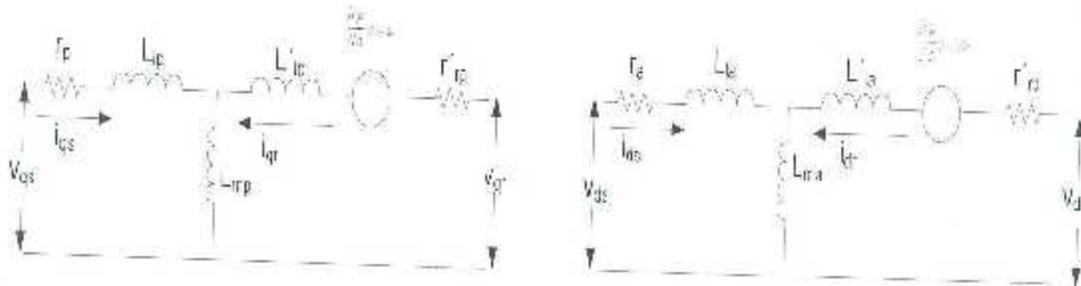


Figura 3.7 Circuitos equivalentes del motor de inducción trifásico asimétrico, considerando el devanado principal y auxiliar del motor de inducción monofásico

$$V_{qs} = r_p i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} \quad (3.11)$$

$$V_{ds} = r_p i'_{ds} + \frac{d\lambda'_{ds}}{dt} \quad (3.12)$$

$$V_{qr} = r'_{rp} i'_{qr} + \frac{d\lambda'_{qr}}{dt} - \left(\frac{N_r}{N_a}\right) \omega_r \lambda'_{dr} \quad (3.13)$$

$$V_{dr} = r'_{ra} i'_{dr} + \frac{d\lambda'_{dr}}{dt} - \left(\frac{N_a}{N_p}\right) \omega_r \lambda'_{qr} \quad (3.14)$$

El par queda de la siguiente forma,

$$T_e = P \left[\left(\frac{N_a}{N_p}\right) \lambda'_{qr} i'_{dr} - \left(\frac{N_p}{N_a}\right) \lambda'_{dr} i'_{qr} \right] \quad (3.15)$$

Donde los enlaces de flujo son

$$\lambda_{qs} = L_{pp} i_{qs} + L_{mp} i'_{qr} \quad (3.16)$$

$$\lambda_{ds} = L_{aa} i'_{ds} + L_{ma} i'_{dr} \quad (3.17)$$

$$\lambda'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_{mp} i_{qs} \quad (3.18)$$

$$\lambda_{qs} = L'_r i_{qs} + L_{mp} i'_{ds} \quad (3.19)$$

$$L_{pp} = L_{lp} + L_{mp} \quad (3.20)$$

$$L_{aa} = L_{la} + L_{ma} \quad (3.21)$$

3.2.3.2 Devanados de fase partida.

El motor de fase partida consiste en dos devanados en el estator diferentes. Un devanado principal con una impedancia más baja que la del devanado auxiliar. Los devanados están acomodados a 90° eléctricos entre ellos. Como se puede apreciar en la figura 3.8 el motor

cuenta con un interruptor centrífugo y una vez que el rotor sobrepasa el 75% de su velocidad nominal, el devanado auxiliar sale de operación.

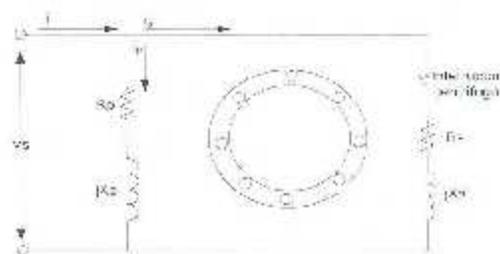


Figura 3.8 Diagrama eléctrico del motor monofásico de fase partida

Los motores de fase partida tienen un par de arranque moderado con baja corriente de arranque y se utilizan para aplicaciones en las cuales no se requieren muy altos pares de arranque, como ventiladores o bombas centrífugas de agua clara. Por lo general son de fracciones de caballo de potencia, [23].

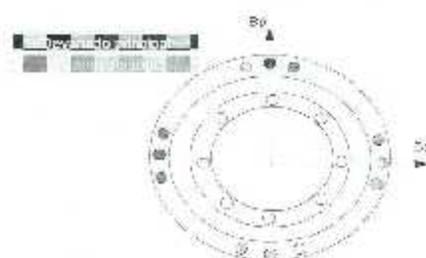


Figura 3.9 Representación de devanados del motor monofásico de fase partida

En [5] se muestra un ejemplo de un motor de fase partida el cual se llevó a simulación con MATLAB SIMULINK. El motor presenta las siguientes características.

$V = 110\text{v}$ Potencia = $\frac{1}{4}$ hp $F = 60\text{ Hz}$ Velocidad = 1800 rpm

$r_p = 2.02 \Omega$ $X_{mp} = 66.8 \Omega$ $r_a = 7.14 \Omega$

$X_{lp} = 2.79 \Omega$ $X_{ca} = 92.9 \Omega$ $X_{ta} = 3.22 \Omega$

$r'_{rp} = 4.12 \Omega$ $r'_{ra} = 5.74 \Omega$

$X'_{rp} = 2.12 \Omega$ $X'_{ra} = 2.95$

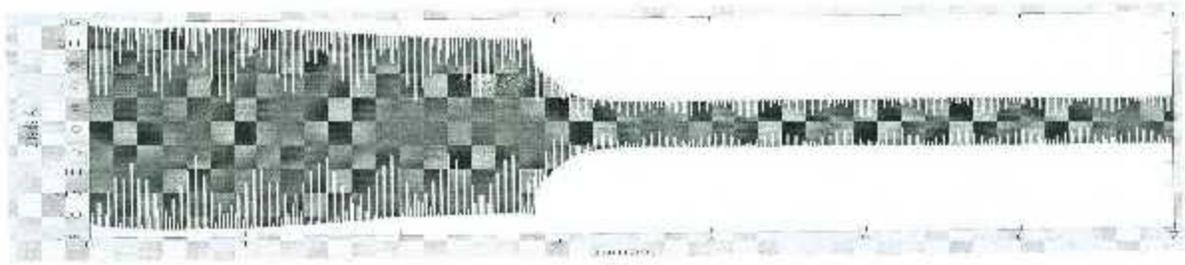


Figura 3.10 Comportamiento de la corriente en el devanado primario.

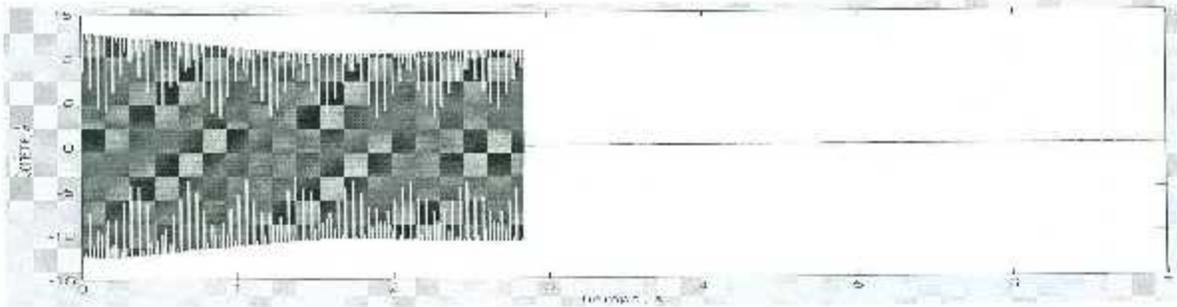


Figura 3.11 Comportamiento de la corriente en el devanado auxiliar.

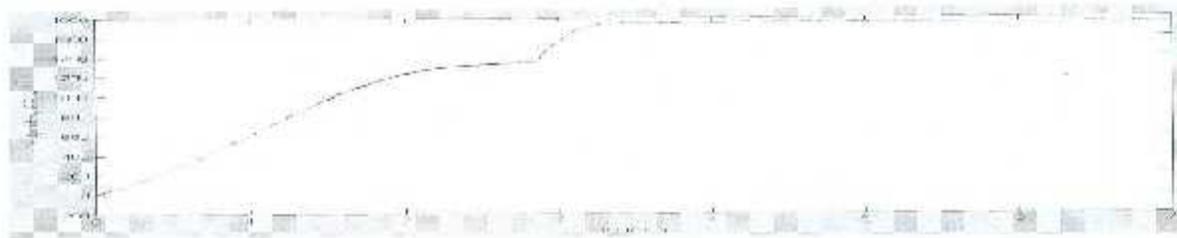


Figura 3.12 Comportamiento de la velocidad de rotor.

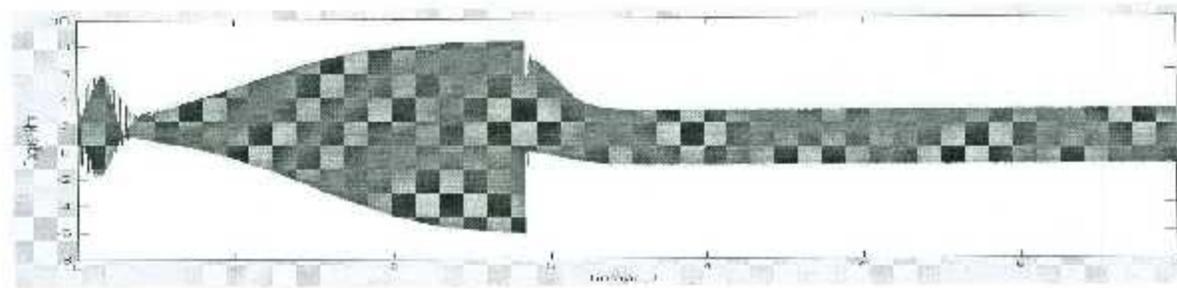


Figura 3.13 Comportamiento del par electromagnético.

3.2.3.3 Motor de arranque por capacitor

Es posible utilizar capacitores para mejorar el desempeño al arranque de los motores. El motor de arranque por capacitor también es un motor de fase partida, fig. 3.14. Se coloca un capacitor en serie con el devanado auxiliar para alcanzar el desplazamiento de los 90° en el tiempo. Una diferencia de fase de 90° en la corriente producirá un solo campo magnético rotacional uniforme del estator y el motor se comportará como si estuviese arrancando conectado a una fuente bifásica. El motor monofásico con capacitor y según su potencia puede sobrepasar el 300% de su valor nominal en el par de arranque, [21].

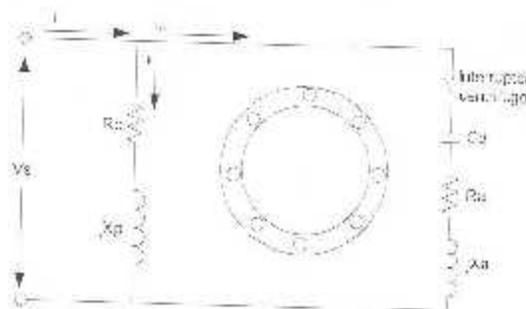


Figura 3.14 diagrama del motor de arranque por capacitor.

Colocando un capacitor en serie con el devanado auxiliar se obtiene un desfase controlado y se aumenta la magnitud del par electromagnético durante el periodo de arranque. Con esta técnica se podría arrancar un motor bifásico con una alimentación monofásica. Para el modelado de este motor se agrega la resistencia del capacitor r_c en serie con la resistencia del devanado auxiliar. Este motor cuenta con un interruptor centrífugo que saca de operación al devanado auxiliar. Los motores con arranque por capacitor son más costosos que los de fase partida y se utilizan en aplicaciones las cuales requieren un par de arranque mayor. Entre las aplicaciones para este motor podemos encontrar compresores, bombas y equipos de aire acondicionado entre otros, [17]

Para la simulación se utilizaron los mismos valores que en el motor de fase partida y solamente se agregó el valor del capacitor en serie con el devanado auxiliar con valores de resistencia y reactancia de 3 y 14.5 ohm, respectivamente.

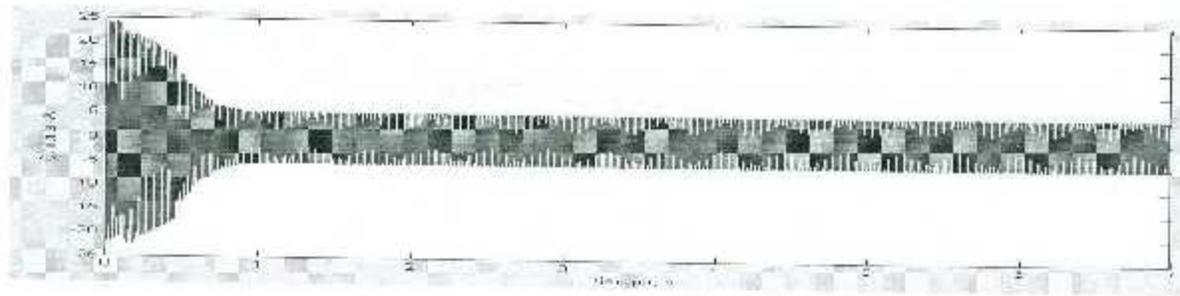


Figura 3.15 Comportamiento de la corriente en el devanado primario.



Figura 3.16 Comportamiento de la corriente en el devanado auxiliar.

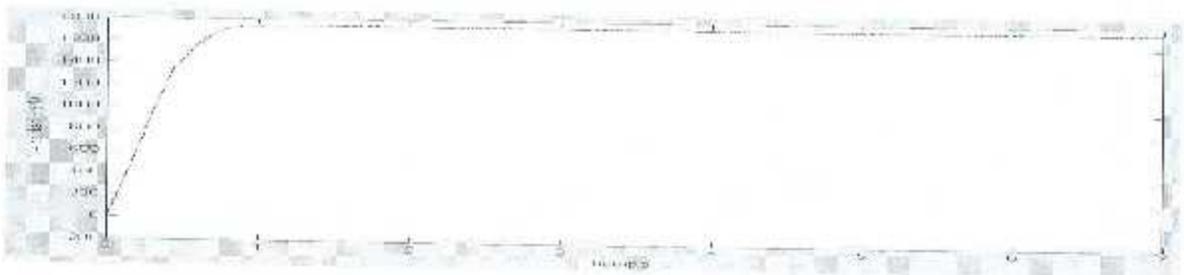


Figura 3.17 Comportamiento de la velocidad en el motor.

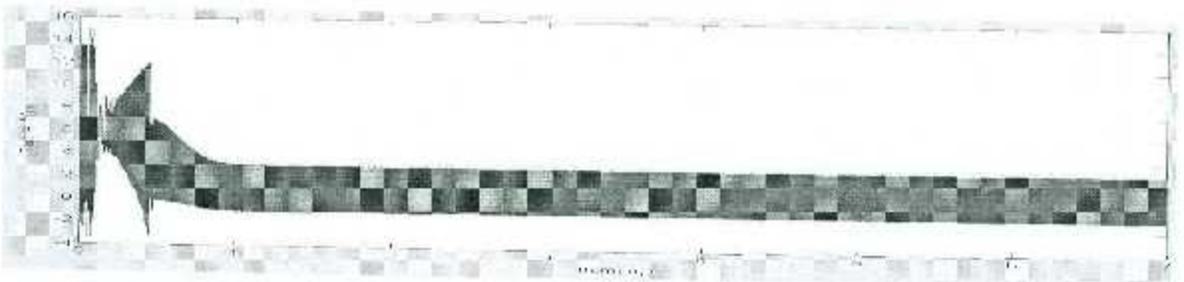


Figura 3.18 Comportamiento del par electromagnético.

3.2.3.4 Motor con capacitor permanente

Otra de las opciones de la cual se ha apoderado de gran parte del mercado es el motor con capacitor permanente. El capacitor y el devanado auxiliar no se interrumpen después de que alcanzó su velocidad nominal. La construcción es más sencilla ya que no lleva interruptor centrífugo. La eficiencia, y las pulsaciones en el par mejoran. Las pulsaciones del par son atenuadas con el capacitor, el cual sirve como depósito de almacenamiento de energía para suavizar las pulsaciones de entrada provenientes de la línea de alimentación monofásica, lo que nos lleva a encontrar un funcionamiento más silencioso que las versiones de los motores donde solo se queda en operación el devanado principal. En esta versión el par de arranque debe ser sacrificado ya que la selección de la capacitancia tendrá que quedar entre los valores de arranque y funcionamiento.

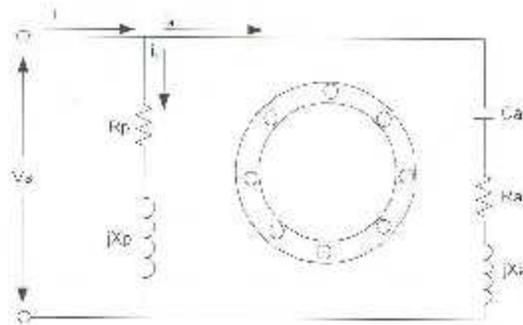


Figura 3.19 Diagrama de motor de arranque y marcha con capacitor.

3.3 Teoría del Motor Bifásico de Inducción.

Una forma de analizar matemáticamente los motores de inducción monofásicos es a través del motor de inducción bifásico y la teoría de la transformación a dos ejes y marcos de referencia empleada en el estudio de los motores polifásicos. El uso de estas teorías ha sido bien validado para estudios de estado estable y transitorio.

La máquina de inducción bifásica es la base de funcionamiento del motor de inducción monofásico, ya que el motor monofásico está compuesto básicamente de dos bobinas donde cada una genera una resultante magnética formando así los ejes ortogonales. El motor monofásico es alimentado por una fuente monofásica y la bifurcación de la alimentación hacia el motor bifásico se realiza a través de un capacitor con la finalidad de desfazar la corriente que recibe una de las bobinas del motor monofásico con respecto a la bobina alimentada directamente desde la fuente eléctrica. Ambas bobinas pueden tener características similares conformando así un motor bifásico simétrico o pueden tener características diferentes para obtener así un motor bifásico asimétrico. Los análisis de cada motor bifásico son diferentes, donde el motor simétrico se puede tratar de manera similar al motor trifásico simétrico en dos ejes y el motor asimétrico se llega a tratar mediante la teoría de campos revolventes, pero es posible aplicar la teoría de los marcos de referencia para realizar los estudios de estado estable y transitorio. [17]

3.3.1 Motor bifásico simétrico.

El motor bifásico simétrico cuenta con dos devanados de características idénticas y se puede analizar de la misma forma que se estudia el motor trifásico simétrico, [17].

Entre las diferencias que se pueden encontrar también son que el motor bifásico cuenta únicamente con las variables i_{qs} , i_{qr} , i_{ds} y i_{dr} , las variables i_{0s} y i_{0r} son ignoradas. Otro cambio está en la variable de las inductancias mutuas. También es necesario cambiar la ecuación del par quedando de la siguiente forma:

$$T_e = \left(\frac{p}{2}\right) L_{ms} (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (3.22)$$

Donde T_e es el par electromagnético, p el número de polos en el estator, L_{ms} la inductancia mutua y las respectivas corrientes en los ejes q y d del rotor y estator.

3.3.2 Motor bifásico asimétrico.

Como se mencionó anteriormente, un motor de inducción monofásico con devanado principal y auxiliar es un ejemplo de un motor de inducción bifásico asimétrico. Para realizar el modelo del motor se supondrá como generalmente se hace que los devanados están en cuadratura de espacio pero que son asimétricos en cuanto a que pueden tener un número diferente de vueltas o una distribución de devanado distinta. En la figura 3.20 se puede apreciar el circuito equivalente del motor bifásico asimétrico, de estos circuitos se desglosan las ecuaciones utilizadas para efectos de simulación.

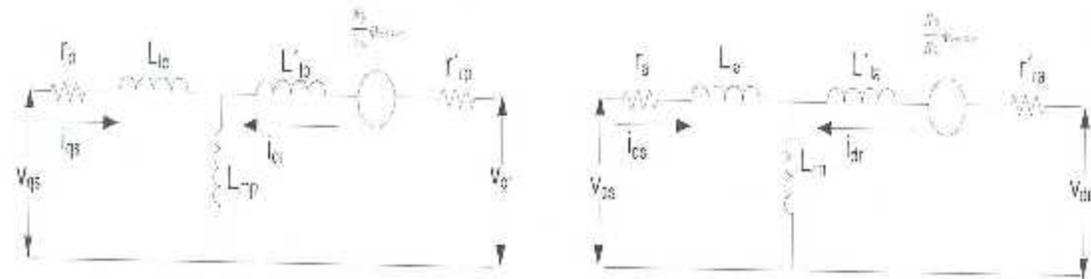


Figura 3.20 circuitos equivalentes del motor bifásico asimétrico.

$$V'_{qds} = r_s i'_{qds} + p \lambda'_{qds} \quad (3.23)$$

$$V'_{qdr} = r'_s i'_{qdr} + p \lambda'_{qdr} \quad (3.24)$$

Donde

$$(\lambda'_{dqr})^T = [\lambda'_{dr} - \lambda'_{qr}] \quad (3.25)$$

El par queda de la siguiente forma,

$$T_e = p \left[\left(\frac{N_a}{N_p} \right) \lambda'_{qr} i'_{dr} - \left(\frac{N_p}{N_a} \right) \lambda'_{dr} i'_{qr} \right] \quad (3.26)$$

Donde los enlaces de flujo son

$$\lambda_{qs} = L_{pp} i_{qs} + L_{mp} i'_{qr} \quad (3.27)$$

$$\lambda_{ds} = L_{aa}i_{ds} + L_{ma}i_{ar} \quad (3.28)$$

$$\lambda_{ar} = L_{ra}i_{ar} + L_{mp}i_{qs} \quad (3.29)$$

$$\lambda_{qs} = L_{rp}i_{qs} + L_{mp}i_{ds} \quad (3.30)$$

$$L_{pp} = L_{rp} + L_{mp} \quad (3.31)$$

$$L_{aa} = L_{le} + L_{ma} \quad (3.32)$$

3.4 Variación de velocidad en motores monofásicos.

Los motores de inducción monofásicos al no contar con su propio campo rotatorio, se encuentran limitados en cuanto a variar su velocidad. Anteriormente la velocidad en los motores de inducción se podía variar mediante transmisiones mecánicas tales como cajas de engranes o sistemas de poleas. En la actualidad cuando se desea variar la velocidad en un motor eléctrico se recurre a dispositivos electrónicos, los cuales son capaces de mover la frecuencia y voltaje de alimentación a los motores. Los motores monofásicos son construidos de baja potencia y su campo de trabajo se encuentra en el uso residencial y en poca aplicación en la industria debido a su baja potencia y su dificultad para variar su velocidad.

La velocidad sincrónica en un motor monofásico se encuentra regida por

$$N_s = \frac{120 f}{p} \quad (3.33)$$

Con la ecuación anterior nos lleva a que solo podemos mover dos variables: la frecuencia f y el número de polos. Se sabe que mover el número de polos en un motor es complicado, tendrían que establecerse desde la construcción del motor y serían velocidades escalonadas. La otra opción que se presenta es el variar la frecuencia, lo que sería directamente proporcional a la velocidad. Pero aquí se presenta otra inconveniencia al mover la

frecuencia de alimentación se mueve ya directamente la reactancia inductiva. La frecuencia influye en la reactancia inductiva de la siguiente forma.

$$X_L = \omega L = 2\pi fL \quad (3.34)$$

Si se mueve la reactancia inductiva impactará directamente la corriente en los devanados. Esta situación obliga a mover también el voltaje de alimentación para mantener la corriente constante.

3.4.1 Variación de velocidad por tensión.

El par del motor de inducción bajo condiciones de arranque y de marcha es directamente proporcional al cuadrado de la tensión aplicada al devanado primario del estator. Al reducir la tensión y el par, el deslizamiento se verá afectado. En general resulta el método menos satisfactorio de control de velocidad. El par máximo a la mitad de la tensión nominal es solo la cuarta parte del par nominal. No será posible obtener un par considerable ni por lo menos el 50 %, la velocidad el motor disminuye rápidamente y éste se detendrá, [22]. Para que este método funcione es necesario que la carga se reduzca conforme se disminuye la tensión y la velocidad. En la fig. 3.21 se puede observar el comportamiento del motor ante la variación de tensión.

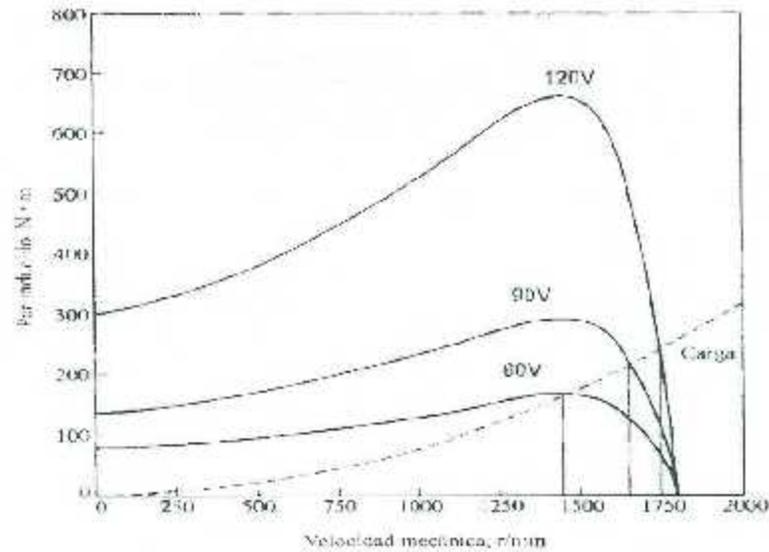


Figura 3.21 Gráfica de par inducido vs velocidad mecánica ante diferentes valores de tensión de un motor de inducción monofásico.

3.4.2 Variación de velocidad por voltaje-frecuencia

Para lograr variar la velocidad de un motor de inducción monofásico es necesario variar el voltaje y la frecuencia linealmente, esta técnica es conocida como técnica de control escalar. La tensión aplicada a las terminales de estator deberá disminuir linealmente con la frecuencia. A detalle con la ley de Faraday

$$v(t) = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (3.35)$$

Si se aplica un voltaje $v(t) = V_m \sin \omega t$ al núcleo, el flujo resultante será

$$\phi(t) = \frac{V_m}{\omega N} \cos \omega t \quad (3.36)$$

Cuando la tensión aplicada a un motor de inducción varía linealmente con la frecuencia por debajo de la velocidad nominal, el flujo en el motor permanece aproximadamente constante, [18]. Esta manera de variar la velocidad tiene una gran aceptación en la industria tanto en lazo abierto así como en lazo cerrado.

Para lograr la variación de velocidad es necesario contar con un convertidor estático de frecuencia que permita alterar el valor de amplitud y frecuencia y poder modificar de esta forma el comportamiento mecánico del motor de inducción.

Con el objetivo de conocer la velocidad que tomará un motor al modificar la frecuencia de alimentación, se realizan algunos cálculos basados en la relación lineal Voltaje-Frecuencia (V/F). Los valores que se tomarán serán dados por el fabricante, tensión y frecuencia nominales. Suponiendo que el motor que tenemos es de 3600 RPM's nominales, determinamos que es de solo un par de polos. Si la alimentación es de 127 volts rms podemos tabular los valores para 10 diferentes frecuencias.

Para calcular voltaje y frecuencia se realizan las siguientes operaciones:

$$V_{Necesario} = \frac{S_{nominal}}{S_{deseada}} V_{nominal} \qquad F_{Necesaria} = \frac{S_{nominal}}{S_{deseada}} F_{nominal}$$

Tabla 3.1 Cálculo de velocidad por V-F

Hertz	Volts	RPM's
15	31.7	893
20	42.3	1199
30	63.5	1800
40	84.6	2398
50	105.8	2999
60	127	3600
65	148.1	4198
70	169.3	4799
75	190.5	5400

Una desventaja de la estrategia V/F es que está dirigida para el control de lazo abierto aunque también ya se utiliza en lazo cerrado más no tiene el alcance de manejar los transitorios de una forma óptima, [22]. Cuando se presentan bajas velocidades, donde el

voltaje de alimentación presenta una disminución significativa, ocasionará que el par presentado por el motor pueda ser insuficiente para ponerlo en marcha, en la figura 3.22 se muestra que con una disminución importante de alimentación y frecuencia nominal, el par se ve también disminuido de forma considerable.

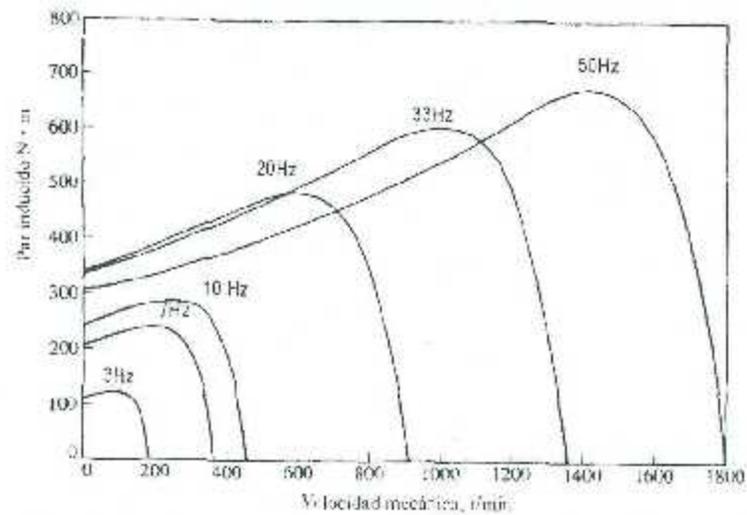


Figura 3.22 Gráfica del par inducido vs velocidad mecánica con variación de voltaje/frecuencia.

Capítulo 4

Bombas Centrífugas

4.1 Introducción

En la industria, la agricultura, así como en uso residencial se presenta con frecuencia la necesidad de transportar líquidos a través de sistemas de tuberías que comúnmente se encuentran a diferentes niveles, por lo que se debe considerar el manejo de diferentes presiones, gasto y velocidades del líquido. Para este tipo de casos es necesario el uso de máquinas mecánicas hidráulicas las cuales se les conoce como bombas [24]. Las bombas tienen la tarea de hacer circular líquidos desde un punto distribuidor hasta un punto terminal para su uso, considerando suministrar un caudal cuya presión sea suficiente para vencer las resistencias a lo largo del circuito de distribución. En este capítulo se considerará el análisis de comportamiento de la bomba centrífuga que en la actualidad es la más utilizada en el transporte de agua clara.

4.2 Términos y conceptos fundamentales

Con la finalidad de conocer la terminología adecuada para el estudio de bombas hidráulicas, se realiza un listado de aquellos términos más comunes. Por otra parte, la figura 4.1 permite conocer algunos de los conceptos que comúnmente se emplean en circuitos hidráulicos

- a) Caudal o capacidad de la bomba - se refiere al volumen de líquido impulsado por una bomba en una unidad de tiempo.
- b) Carga estática de succión - es la distancia vertical desde el nivel de líquido de succión hasta la línea central de la bomba.
- c) Carga estática de descarga - es la distancia vertical desde el nivel de líquido y la línea central de la bomba.

- d) Carga estática total.- es la distancia vertical entre los niveles de líquido en los puntos de succión y descarga
- e) Carga de fricción.- es la carga, expresada en unidades de longitud, necesaria para vencer la resistencia de las tuberías de succión, descarga y los accesorios que contenga el sistema. Puede ser positiva o negativa dependiendo de la posición de la bomba con el nivel del líquido.
- f) Presión de succión.- se refiere a la altura desde la cual el fluido puede ser succionado por la bomba
- g) Presión de descarga.- es la altura a la cual puede ser bombeado un fluido.
- h) Carga de la bomba o altura de bombeo.- Caracteriza a la energía específica cedida por la bomba al líquido.

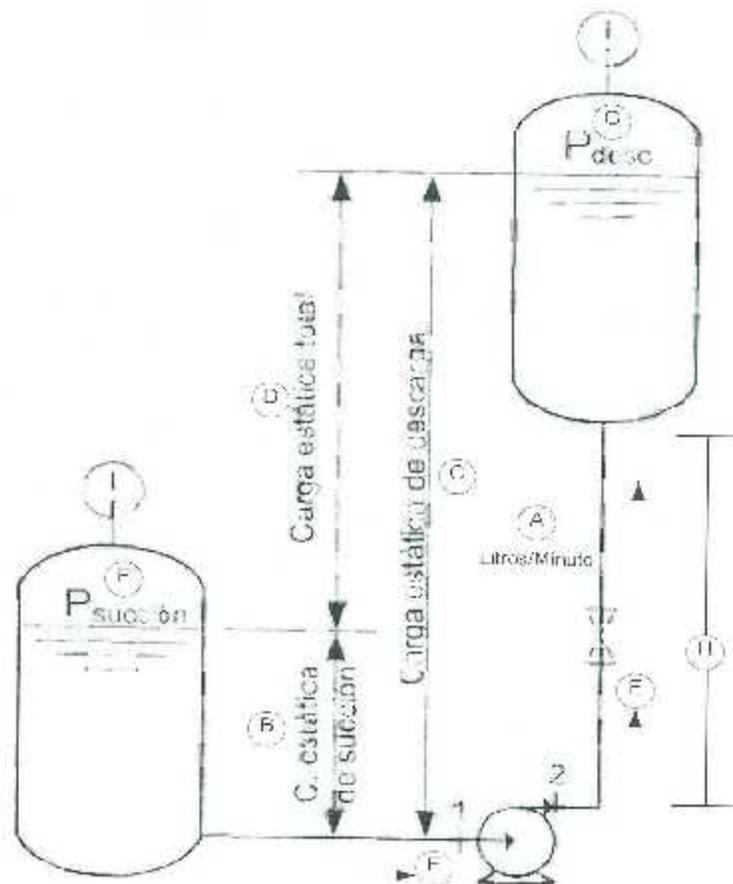


Figura 4.1 Representación de los conceptos fundamentales de un sistema de bombeo [25]

4.3 Características de las Bombas centrífugas

Una bomba centrífuga es uno de los tipos más comunes de equipo en cualquier planta de procesos, riego o uso doméstico residencial. Su tamaño compacto y poco requerimiento de mantenimiento son factores por los cuales su aceptación va en aumento.

La bomba centrífuga es una máquina hidráulica compuesta en esencia por un impulsor con alabes, que accionado por una fuerza externa transmite al líquido la energía necesaria para obtener una presión determinada. El cuerpo de la bomba o voluta recibe al líquido que sale del impulsor y por su construcción especial transforma su energía cinética en presión, dirigiéndolo hacia la etapa de descarga.

4.3.1 Elementos de una bomba centrífuga

- a) Tubería de aspiración, termina donde comienza la brida de aspiración.
- b) Impulsor o rodete, está formado por un conjunto de alabes que pueden adoptar diversas formas. Según para la aplicación de la bomba. Gira dentro de una carcasa circular. El impulsor está unido con el eje y es la parte móvil de la bomba la que se encarga de generar el movimiento cinético con su giro.
- c) Voluta. Es la pieza en forma de caracol que envuelve al impulsor la separación entre la voluta y el impulsor es mínima y va aumentando conforme se acerca al área de la abertura de impulsión. Su función es darle la dirección de salida al líquido.
- d) Tubería de impulsión. Comienza a la salida de la voluta y es por aquí donde el líquido es evacuado a la velocidad generada en la bomba.

En la fig. 4.2 se pueden apreciar gráficamente la posición de cada elemento descrito de la bomba. Se le denomina bomba centrífuga porque la cota de presión que crea es ampliamente a la acción centrífuga. Las paletas imparten energía al fluido por la fuerza de esta misma acción. Esta aceleración produce un apreciable aumento de energía de presión cinética, lo cual es debido a la forma de caracol de la voluta para generar un incremento gradual en el área de flujo de tal manera que la energía cinética a la salida del rodete se convierte en presión a la salida.

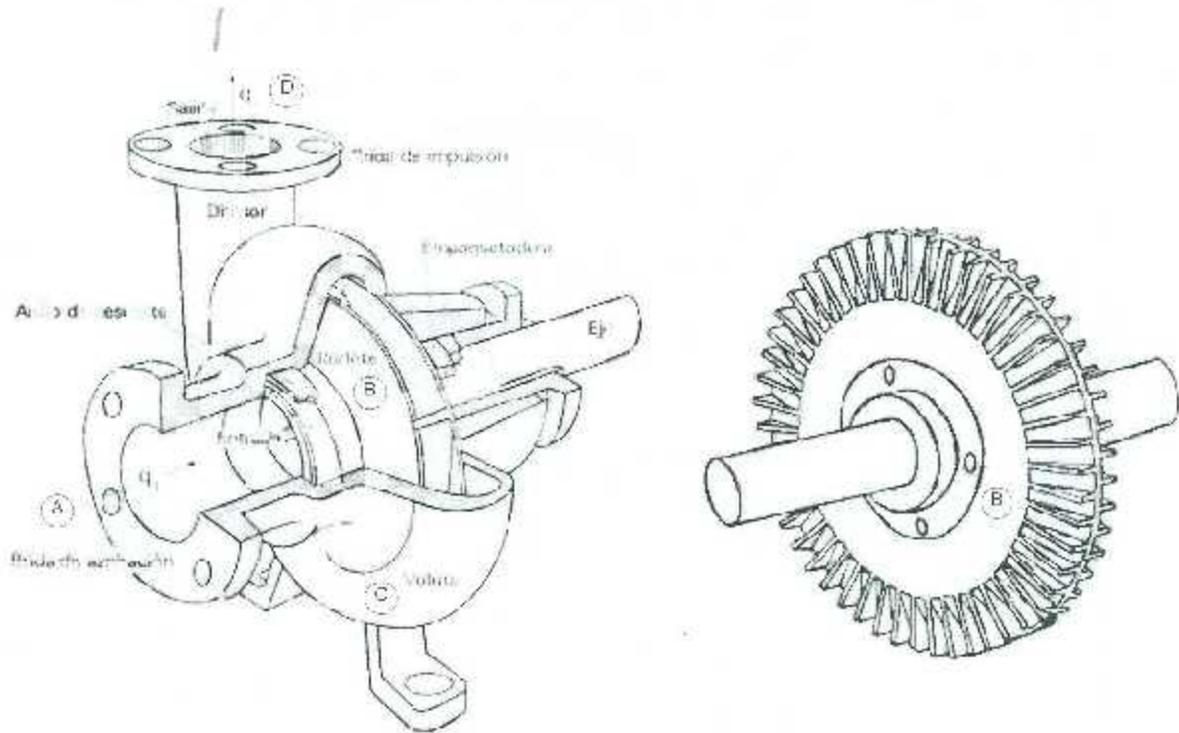


Figura 4.2 Elementos de una bomba centrífuga [26].

4.3.2 Potencia y Rendimiento de una bomba centrífuga

Cuando se impulsa un líquido a través de una bomba, se presentan diversas situaciones físicas como rozamiento en cojinetes, fricción con el líquido, fricción en tuberías, las cuales causan pérdidas de potencia a través del sistema. El rendimiento del motor η_{motor} se obtiene de la relación entre potencia energética consumida y potencia al eje del motor. El rendimiento hidráulico $\eta_{hidraulico}$ es la relación entre la energía entregada en el eje de la turbina y la energía absorbida por el rodamiento. De igual forma que la anterior, las pérdidas son causadas por la fricción en rodamientos y los cambios bruscos de velocidad [27].

En la figura 4.3 podemos apreciar un diagrama de Sankey en el que se presentan las diferentes pérdidas en una bomba centrífuga.

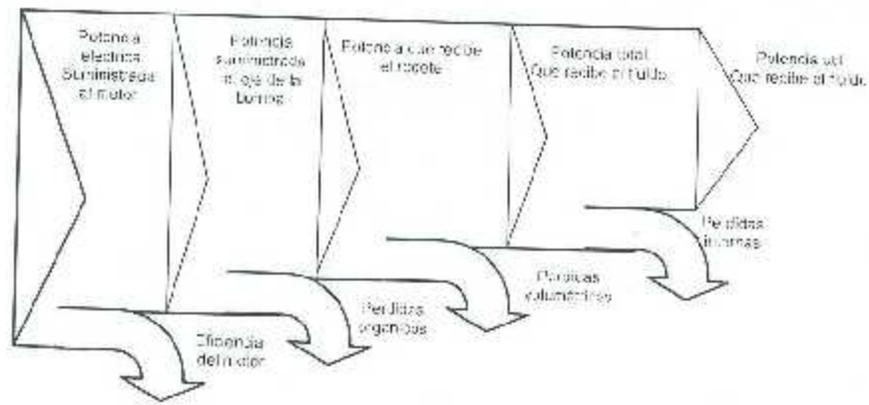


Figura 4.3 Diagrama de Sankey de una bomba centrífuga.

La potencia aplicada al agua por la bomba es

$$P_u = Q_u H_{man} \gamma \quad (4.1)$$

Donde Q_u es el caudal útil expresado en litros/segundos, H_{man} es la altura manométrica total en metros y γ es el peso específico del líquido.

La potencia requerida para operar la bomba es determinada por los caballos de fuerza de frenado P_f . Se refiere a la diferencia entre la potencia que se aplica a la flecha de la bomba y la potencia que transfiere la bomba al líquido.

$$P_f = \frac{P_e}{\eta_b} \quad (4.2)$$

Donde η_b es la eficiencia de la bomba.

4.4 Leyes de semejanza y afinidad

Las curvas características de las bombas centrífugas permiten relacionar el caudal con la altura generada, la potencia absorbida, la eficiencia y con la altura máxima de absorción. El funcionamiento de una bomba centrífuga puede describirse con elevada precisión mediante las ecuaciones de semejanza. Las leyes de semejanza [28] son unas ecuaciones que permiten predecir el comportamiento de una bomba, bajo condiciones de operación distintas. Cuando se conocen las características de caudal, carga de la bomba y potencia a

una cierta velocidad de rotación n_1 , se puede estimar el funcionamiento a otra velocidad de rotación n_2 , utilizando las siguientes ecuaciones.

Caudal

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (4.3)$$

Carga

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad (4.4)$$

Potencia

$$\frac{P}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad (4.5)$$

Las leyes de afinidad establecen lo siguiente

- a) El caudal varía con la velocidad de rotación del rotor.
- b) La presión varía con el cuadrado de la velocidad de rotación
- c) La potencia varía con el cubo de la velocidad de rotación

Estas leyes de afinidad tienen una limitación la cual es que dejan de aplicarse cuando la diferencia entre velocidades es muy grande.

4.5 Efecto de Cavitación

Las bombas centrifugas funcionan con normalidad si la presión absoluta a la entrada del rodete es mayor que la presión de vapor. [29]. Cuando el líquido es impulsado por la bomba se produce un cambio de presión. Si la presión absoluta del líquido cae por debajo de su presión de vapor, se producirá el efecto de cavitación. En el interior de la bomba se generan burbujas de vapor que disminuyen el espacio utilizable en el interior de la tubería, ese

efecto perturba la continuidad del flujo, disminuyendo el caudal, la altura manométrica, y el rendimiento de la bomba. La cavitación genera ruidos, vibraciones lo cual se traduce en un golpeteo sobre los alabes que se transmite al eje y cojinetes. En la Fig. 4.4 se aprecia el comportamiento del flujo del líquido cuando se presenta el efecto de cavitación.

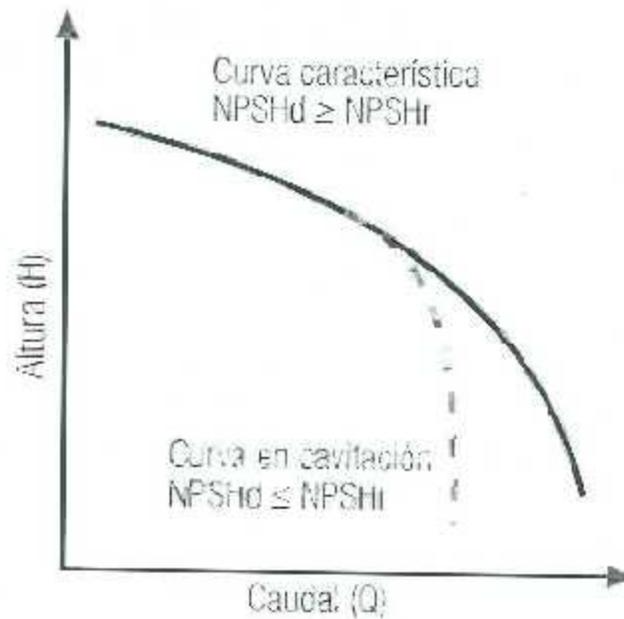


Figura 4.4 Efecto de cavitación sobre la curva característica de la bomba altura vs caudal.

Entre los cuidados que se deben realizar para evitar la cavitación se encuentra que la altura neta de entrada requerida sea menor que la altura neta de entrada disponible ($NPSH_d > NPSH_r$). La $NPSH_r$ depende de las características de la bomba, por lo que es dato que debe entregar el fabricante en sus curvas de operación. Se obtiene de

$$NPSH_r = H_m + \frac{v^2}{2g} \quad (4.6)$$

Donde H_m es la altura mínima necesaria a la entrada del rodete en m.c.l (metros de columna de líquido.) y $\frac{v^2}{2g}$ es la presión cinética correspondiente a la velocidad de entrada de líquido en la boca de aspiración en m.c.l.

Por la otra parte NPSHd depende de las características de instalación y del líquido a bombear.

$$NPSHd = \frac{Pa}{\gamma} - H_a - hf + \frac{pv}{\gamma} \quad (4.7)$$

Donde γ es el peso específico del líquido en N/m^3 , Pa es la presión en el nivel de aspiración en Pa, H_a es la altura geométrica de aspiración en m.c.l., hf es la pérdida de carga en la línea de aspiración en m.c.l., Pv es la presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo en Pa.

Se recomienda una diferencia mínima de 0.5m para asegurarse de que no se presentará cavitación. El aumento del número de revoluciones de la bomba implica un aumento en el caudal, lo que lleva implícito un aumento de la velocidad del líquido, y un aumento de la altura neta de entrada requerida (NPSHr), en ocasiones es necesario limitar el caudal y el número de revoluciones de la bomba [30].

4.6 Modelo de la bomba centrífuga

El modelo presentado describe el par de carga y la columna de agua de la bomba en función del flujo y la velocidad. Las expresiones son deducidas a partir del estudio de las turbomáquinas: la ecuación de transporte de Reynolds y el triángulo de velocidades de Euler [26].

$$T = a_{t2} Q_i^2 + a_{t1} Q_i \omega_r + a_{t0} \omega_r^2 \quad (4.8)$$

Donde

$$a_{t0} = \rho \left[\frac{r_2 \cos(\beta_2)}{\Delta_2} - \frac{r_1 \cos(\beta_1)}{\Delta_1} \right] \quad (4.9)$$

$$a_{t1} = \rho(r_2^2 - r_1^2) \quad (4.10)$$

Así mismo:

$$H = a_{h2} Q_i^2 - a_{h1} Q_i \omega_r - a_{h0} \omega_m^2 \quad (4.11)$$

Dónde:

$$a_{h1} = \sigma_s \left[\frac{r_2 \cot(\beta_2)}{BA_2} - \frac{r_1 \cot(\beta_1)}{A_1} \right] \quad (4.12)$$

Tabla 4.1 Variables utilizadas en el modelado de la bomba centrífuga.

Abv.	Nombre
J	Momento de inercia del rotor y el impulsor
R	Fricción lineal
ω_r	Velocidad angular mecánica del rotor
θ_m	Posición angular mecánica del rotor
T_e	Torque eléctrico
T_c	Torque de carga
Q_i	Caudal
ρ	Densidad del líquido
g	Gravedad
r_{b1}	Radio de entrada y salida del impulsor
$A_{1,2}$	Área de entrada y salida del impulsor
$\beta_{1,2}$	Ángulo de entrada y salida de impulsor
λ_r	Coefficiente de deslizamiento
a_{t2}	Coefficiente de pérdidas de torque por fricción
a_{h2}	Coefficiente de pérdidas de altura por fricción
H	Altura producida por la bomba

4.6.1 Simulación de una bomba centrífuga

Para analizar la bomba centrífuga se llevó a cabo una simulación con el software Matlab-Simulink. Para el modelado de la bomba se utilizó un bloque del software el cual ya contiene valores predefinidos; se cargaron los valores de la bomba experimental, una potencia de 1/2 Hp, un diámetro de 3/4 de pulgada en la entrada del impulsor. En la Fig. 4.5 se aprecian los bloques utilizados, desde el peso específico del líquido, la tubería utilizada con sus parámetros físicos como diámetro interno, medidas de distancia, presión inicial, material de la tubería y coeficientes de fricción.

En el siguiente modelo de SIMULINK, se presenta un sistema de bombeo, el cual cuenta con una bomba centrífuga de 3600 rpm y una potencia de ½ hp. La bomba tiene los parámetros que se pueden apreciar en la fig. 4.6, se colocó una tubería de 30 metros de distancia horizontal, un depósito del que extrae el agua y uno más al que se dirige. Se colocaron distintos dispositivos de medición de presión y de caudal de agua. El tiempo de simulación se programó a 10s. el guio mecánico de la bomba está regido por una rampa hasta 3400 RPMs la cual arranca de 0 y llega al punto máximo en 1s. Las características del agua se tomaron a 20°.

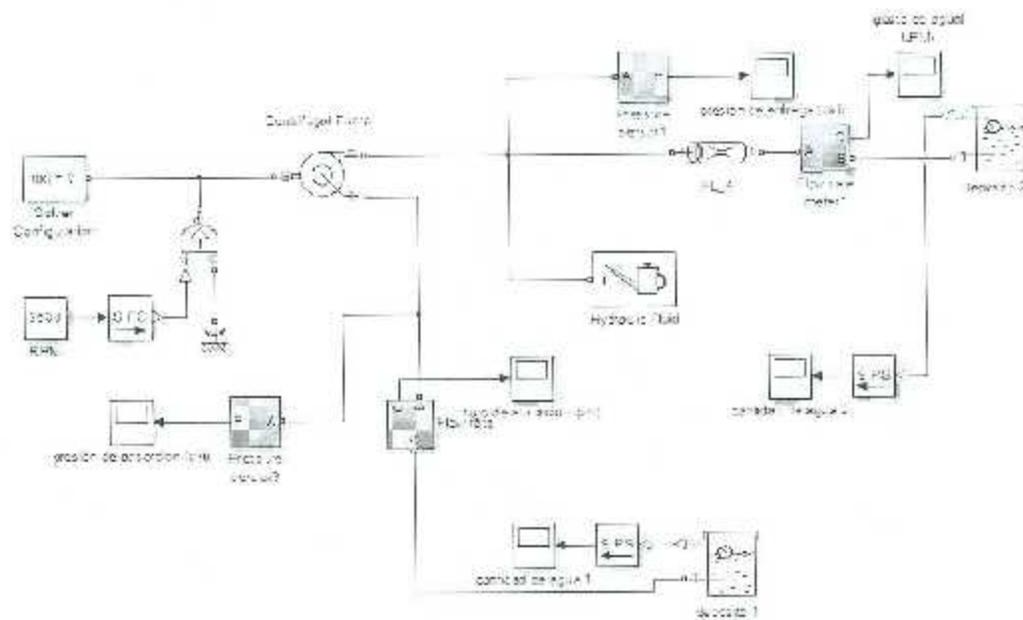


Figura 4.5 Diagrama de bloques de la bomba centrífuga en MATLAB-Simulink



Figura 4.6 Parámetros de la bomba.

En la figura 4.7 se aprecia que le toma 2 segundos alcanzar su máxima presión, la cual tiene una amplitud de 3.9 psi.

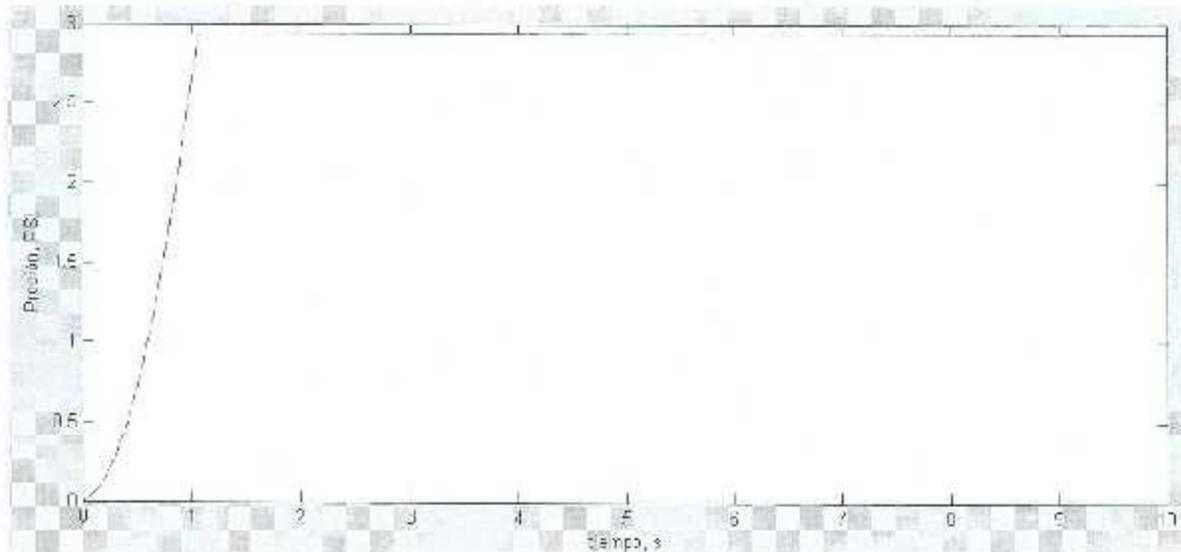


Figura 4.7 Presión ejercida por la bomba.

En la figura 4.8 se aprecia el volumen en litros que entra al depósito receptor el comportamiento es prácticamente lineal, en la imagen se observa que llega a 5.5 litros en 10 segundos, con esa relación entrega 33 litros por minuto. Por último en la figura 4.9 se puede apreciar el caudal que pasa por la tubería en litros por minuto. En la imagen se

observa una rampa que llega a su punto máximo en 1s, esa rampa es consecuencia de la rampa con la que se puso en movimiento el rodete de la bomba.

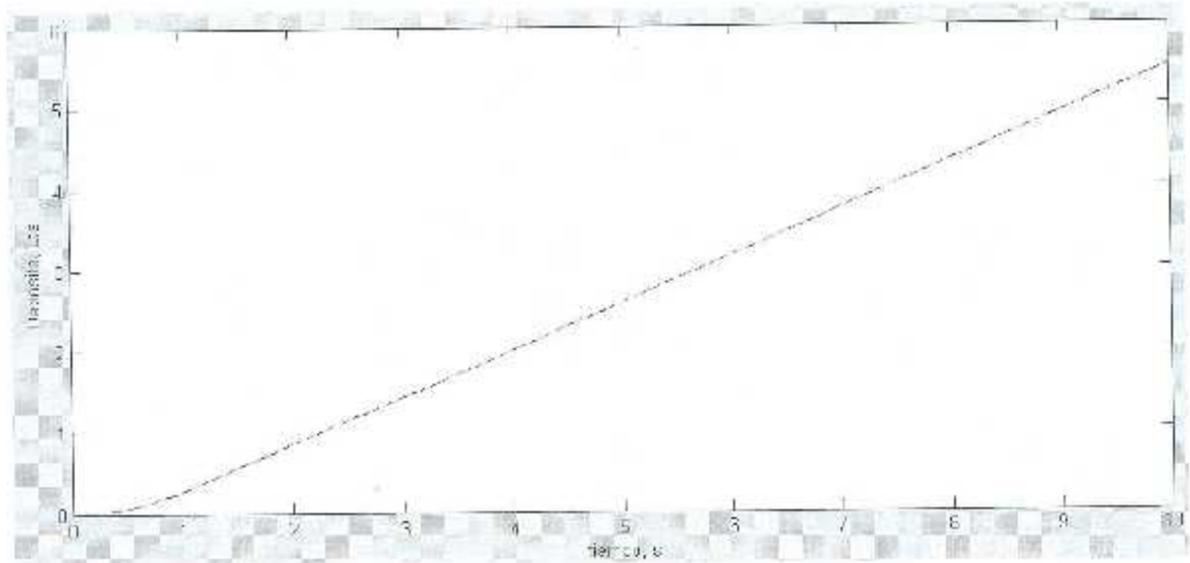


Figura 4.8 Volumen del depósito receptor.

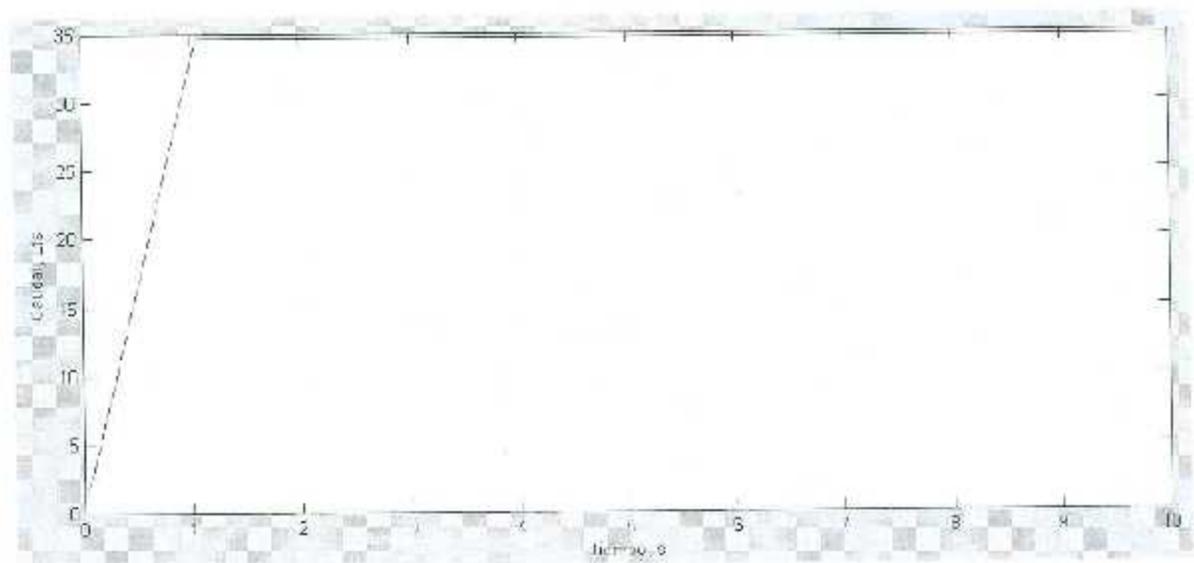


Figura 4.9 Caudal en la tubería en litros por minuto.

Capítulo 5

Celdas Fotovoltaicas y Almacenamiento de Energía.

5.1 Introducción.

En algún momento se ha tenido la oportunidad de disfrutar de la luz y el calor generados por el Sol. Como se sabe son energías limpias no contaminantes y al parecer hasta el momento inagotable. A lo largo de la historia se han encontrado diferentes métodos para el aprovechamiento de efectos cíclicos ya que día tras día el sol se hace presente.

El uso de celdas fotovoltaicas se ha convertido en un tema de actualidad en la sociedad, el hecho de que se pueda aprovechar energía luminosa del sol para obtener energía eléctrica ha acaparado la atención de numerosos investigadores e inversionistas.

Casi de la mano de los módulos fotovoltaicos va el uso de baterías recargables, las cuales brindan el servicio de almacenamiento de energía cuando no se dispone de líneas de distribución eléctrica o que se desee en un sistema autónomo almacenar energía. Las baterías recargables cuentan con diferentes características las cuales se deben tomar en cuenta para decidir cual dará el mejor resultado para la aplicación deseada.

5.2. Celdas fotovoltaicas.

Las celdas fotovoltaicas son dispositivos que permiten obtener energía eléctrica a partir de energía luminosa, están construidas por material semiconductor el cual al ser impactado por fotones entrega una potencia eléctrica en terminales [31], [32], [33].

5.2.1 Datos Históricos.

El físico francés Edmund Bequerel fue el pionero en escribir sobre el efecto fotovoltaico, mientras efectuaba experimentos con una pila electrolítica en 1839. Bequerel se percató que al exponer la sustancia electrolítica aumentaba la generación de electricidad. A finales del siglo XIX científicos como W. Smith, W. Adas y R. Day descubren la fotoconductividad en el selenio y construyen la primera celda experimental partiendo de una oblea de selenio [31]. La compañía Western Electric fue la primera en comercializar las celdas solares en 1955 con el 4.5 % de eficiencia.

En 1958 fue lanzado al espacio el primer satélite que utilizaba celdas fotovoltaicas llamado Vanguard I con una eficiencia del 9 %. Contaba con un sistema de potencia de 0.1 W en aproximadamente 100 cm² y tuvo un periodo de vida útil de 8 años [34].

5.2.2 Efecto Fotovoltaico.

El efecto fotovoltaico se produce cuando el material de la celda solar ya sea silicio o selenio (entre los más usados), absorbe parte de los fotones de la luz incidente producida por el sol (fig. 5.1). Los materiales semiconductores tienen la habilidad de que su conductividad puede ser modificada. Al incidir los rayos del sol en un semiconductor algunos de los electrones de la banda de valencia absorben energía de los fotones y pasan a la banda de conducción donde pueden ser llevados fácilmente a un circuito externo generando una corriente eléctrica. Al dejar su lugar los electrones, provocan en el material "huecos" los cuales se les consideran una partícula positiva. Se dice que los huecos se mueven en sentido opuesto a los electrones. Para que los electrones y huecos generados por la luz solar no se recombinen

dentro del semiconductor se debe contar con un campo eléctrico interno, en cuyo sentido se moverán los electrones. Este campo eléctrico es producido en general por una unión similar a la del diodo semiconductor.

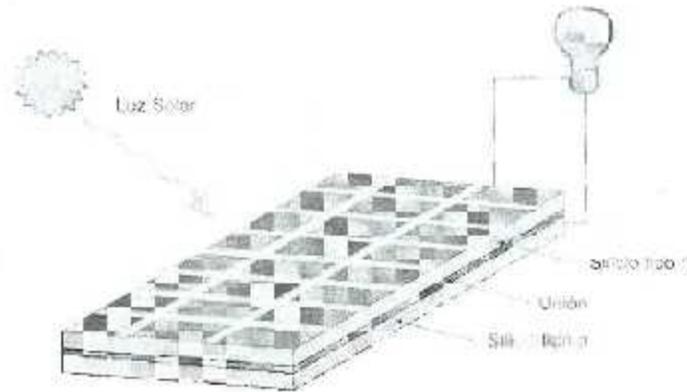


Figura 5.1 representación del funcionamiento de una celda solar.

5.2.3 Estructura de una celda solar.

El elemento más importante en una celda solar es el semiconductor. La estructura física o arreglo atómico se puede dividir en tres grupos: Cristal simple, policristalino y amorfo. Se puede apreciar la diferencia física en la fig. 5.2.

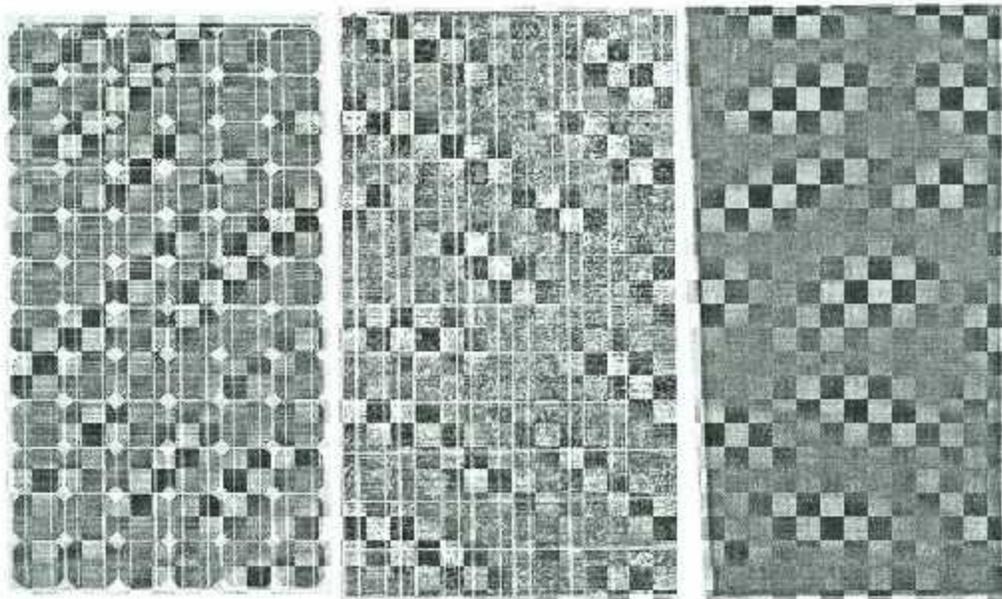


Figura 5.2 De izquierda a derecha, módulos monocristalino, policristalino y amorfo.

5.2.4 Modelo de la celda fotovoltaica.

La característica corriente-tensión de una celda solar se puede explicar por el modelo de único diodo. El circuito equivalente se muestra en la figura 5.3 y se describe mediante ecuaciones de la siguiente manera.

$$I = I_i - I_0 \left(\exp \frac{q(V+I R_s)}{kT} - 1 \right) - I_{Rp} \quad (5.1)$$

$$R_p = R_{p,osc} e^{-\alpha E} \quad (5.2)$$

$$I_{Rp} = \frac{V+I R_s}{R_p} \left(1 + \alpha \left(1 - \frac{V+I R_s}{V_{br}} \right)^{-m} \right) \quad (5.3)$$

La ecuación que describe adecuadamente la característica I-V de las celdas fotovoltaicas es la siguiente:

$$I = I_i - I_0 \left(\exp \frac{q(\sum V+I R_s)}{kT} - 1 \right) - I_{Rp} \quad (5.4)$$

Donde

Tabla 5.1 Variables utilizadas en el modelado de la celda solar:

A	Factor avalancha
E	Irradiancia en W/m^2
I_0	Corriente de saturación del diodo
I_i	Foto Corriente
I_{Rp}	Corriente de la resistencia en paralelo
K	Constante de Boltzman $1.381 \times 10^{-23} J/K$
M	exponente avalancha
Q	Elemento de carga $1.602 \times 10^{-19} As$
R_p	Resistencia en paralelo
R_s	Resistencia en serie
T	Temperatura en K
V_{br}	voltaje de ruptura
α	coeficiente dependiente de la irradiancia en R_p , en m^2/W

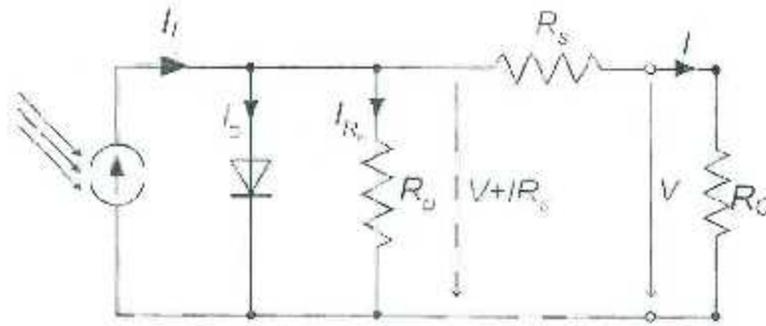


Figura 5.3 Circuito correspondiente a la ecuación del modelo de la celda fotovoltaica.

5.2.4.1 Curvas de comportamiento.

Se modeló en MATLAB-Simulink el panel solar modelo CX-50 el cual presenta las siguientes características.

Potencia	50w
Corriente a corto circuito	3.40 Amps
Corriente a potencia máxima	3.07 Amps
Voltaje a circuito abierto	21 Volts
Voltaje a potencia máxima	16.4 Volts

Se obtuvieron las gráficas de comportamiento con el modelo desarrollado en [37]. El modelo se muestra en la figura 5.4 y 5.5.

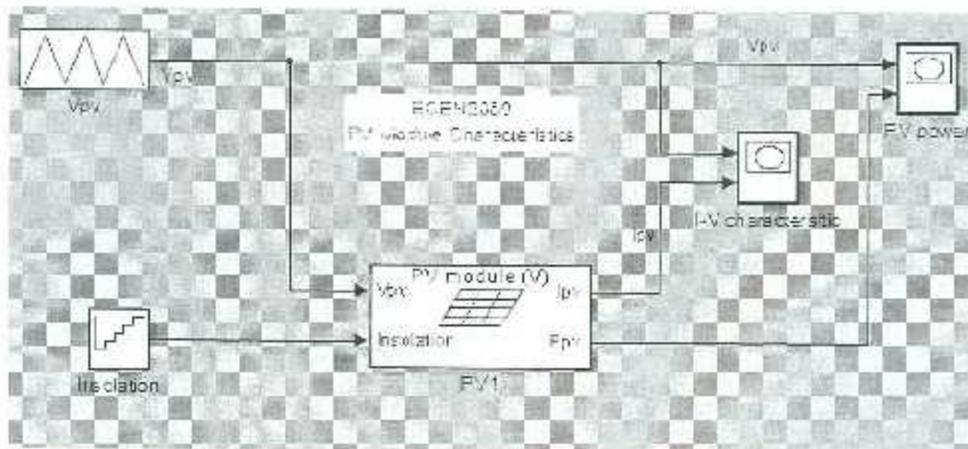


Figura 5.4 Modelo de la celda fotovoltaica.

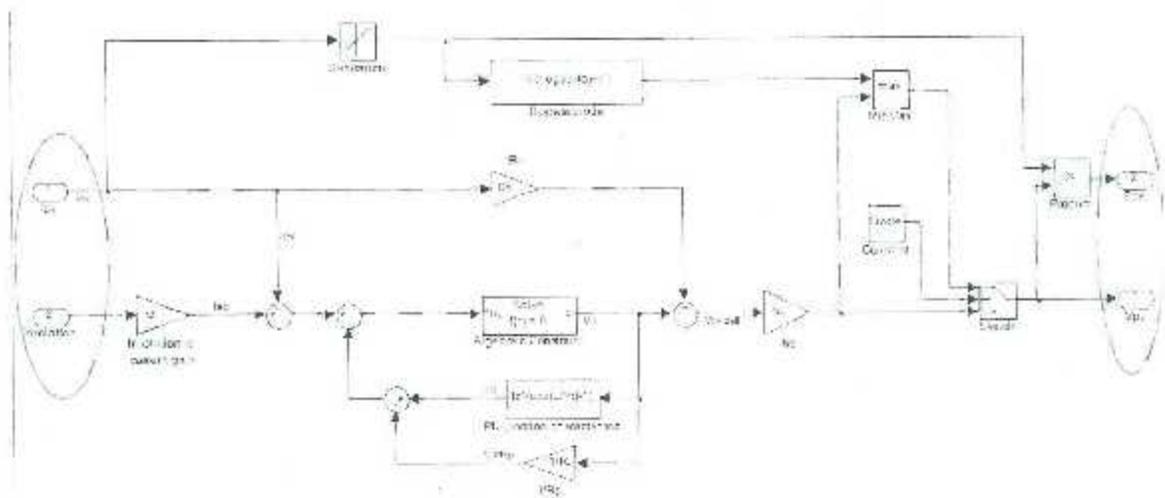


Figura 5.5 Modelo del módulo PV

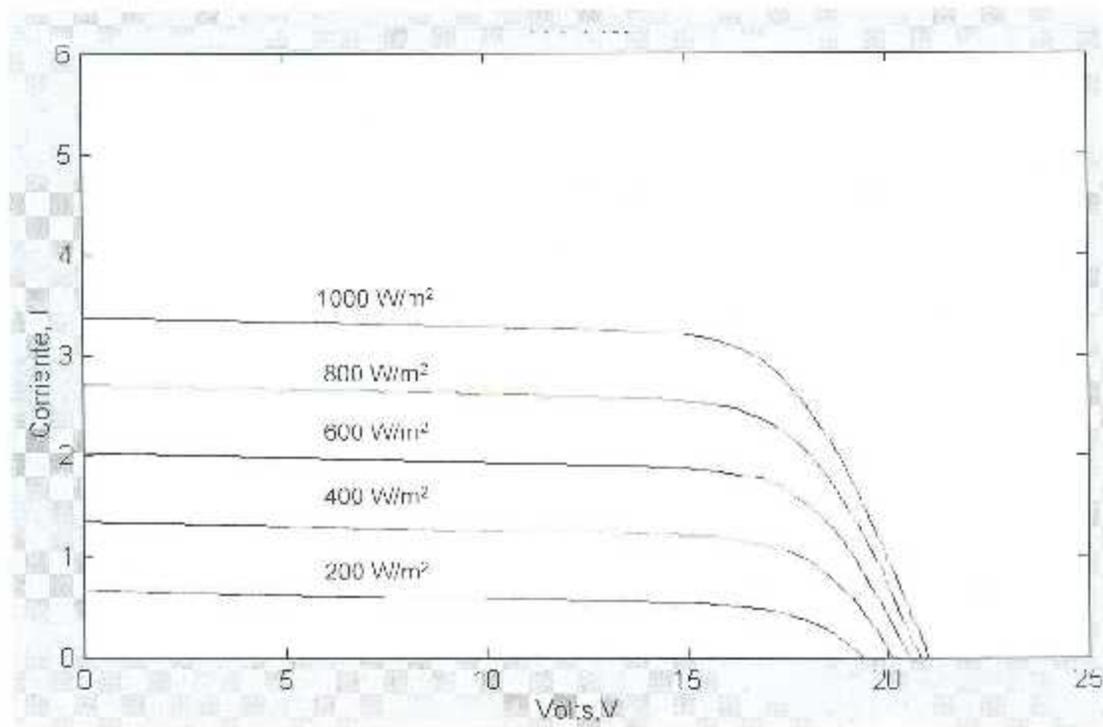


Figura 5.6 Gráfica V-I del comportamiento del módulo PV

La característica de tensión-corriente con diferentes valores de irradiancia es mostrada en la fig. 5.6 y en la fig. 5.7 se muestra la característica voltaje-potencia a diferente incidencia solar. En la fig. 5.7 se puede notar que existe un punto de máxima potencia (PMP). Para que la potencia de la celda pueda aprovecharse de la manera óptima, es importante que se

trabaje en ese punto. El punto de operación del sistema fotovoltaico cambia su PMP debido a los cambios de irradiación solar, la temperatura de las celdas y la carga, por lo que es conveniente aplicar un seguidor de PMP al sistema el cual force a que el arreglo fotovoltaico opere en el PMP bajo cualquier condición, obteniendo como resultado mayor captación de energía solar.

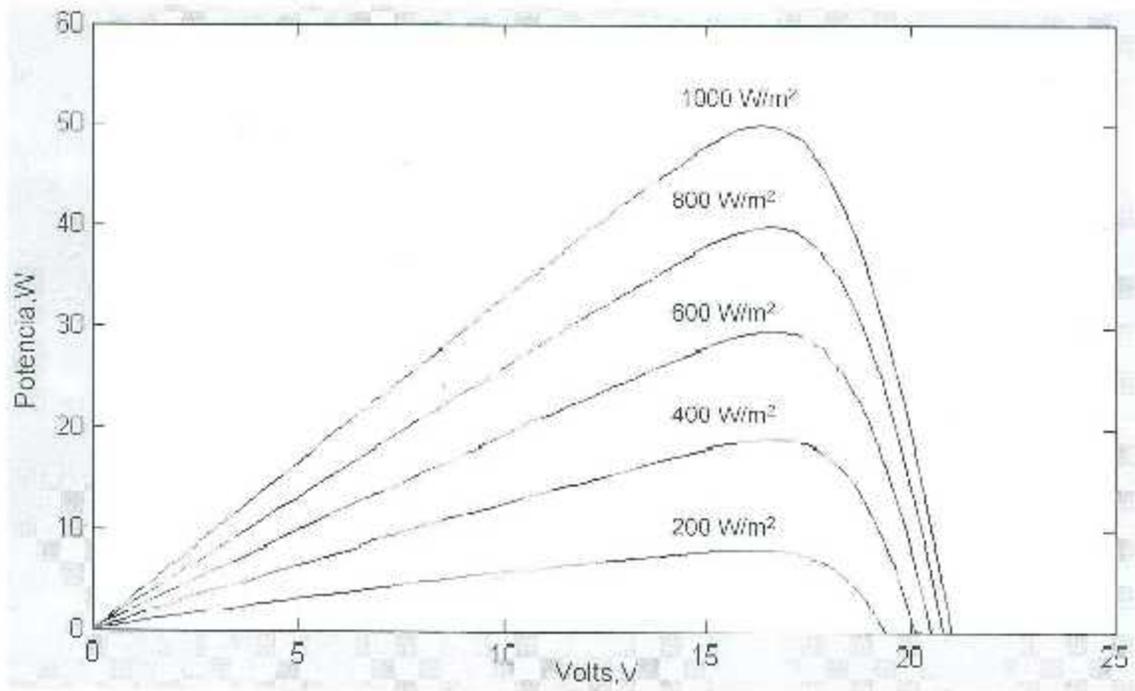


Figura 5.7 Gráfica V-P del comportamiento del módulo FV

5.3 Almacenamiento de Energía

Como se mencionó anteriormente, la energía que entregan los módulos fotovoltaicos en sistemas aislados y con utilización en horarios donde no se encuentra la luz irradiada por el sol, ésta se tiene que almacenar. Entre los tipos de almacenamiento se encuentran el eléctrico y químico. El almacenamiento eléctrico se refiere a los capacitores e inductores que permiten el almacenamiento de tensiones y corrientes eléctricas. El almacenamiento químico se obtiene por el efecto electroquímico y son conocidos como baterías.

Considerando los dos tipos de almacenamiento de energía, los medios de almacenamiento eléctrico presentan mayor dificultad en cuanto la forma de retener la energía, por lo que para aplicaciones de mediana potencia es más fácil emplear el almacenamiento por medio de bancos de baterías. Además, en la actualidad, la forma más común de almacenar energía producida por módulos fotovoltaicos es mediante el proceso electroquímico, [35]. Adicionalmente una función importante de las baterías es proveer una intensidad de corriente superior a la que los módulos fotovoltaicos pueden entregar [35].

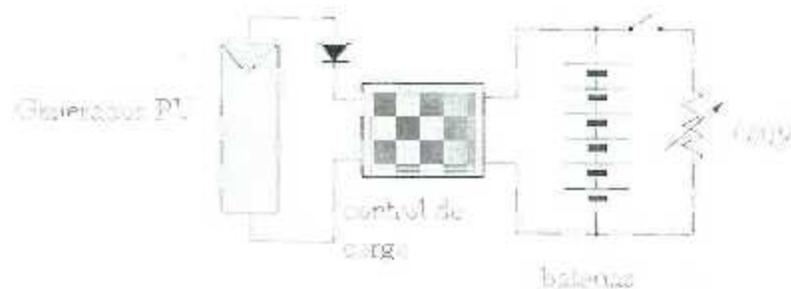


Figura 5.8 Diagrama de conexión con arreglo de baterías.

En la actualidad se pueden encontrar diferentes tipos de baterías con características diferentes, en la tabla 5.2 se hace una comparación de diferentes características. De igual forma se puede observar una comparación en la gráfica de la figura 5.9 donde se comparan sus capacidades en relación a su peso (masa x gravedad) (eje horizontal) y su volumen (eje vertical). En la gráfica se puede notar que a medida que se aleja del origen se encuentran las baterías que almacenan una mayor cantidad de energía tanto por unidad de volumen como de masa.

Tabla 5.2 Comparación entre las baterías más utilizadas.

Tipo	Plomo (Pb)	Níquel-Cadmio (Ni-Cd)	Níquel-Hidruro (Ni-MH)	iones de Litio (Li-Ion)	Polímero de Litio (Li-Pol)
Voltaje por Célula	2 V	1.2 V	1.2 V	3.7 V	3.7 V
Ah	7-960 Ah	0.5-1 Ah	0.5-16 Ah	-	-
Memoria	Medio	Muy Alto	Bajo	Inexistente	Inexistente
Potencia/Kilo	30 Wh/Kg	50 Wh/Kg	70 Wh/Kg	110-160 Wh/Kg	100-130 Wh/Kg
Sobrecarga	No soportado	Soportado	No recomendable	Soportado	Soportado
Descarga	No soportado	Necesaria	Recomendable	Fallo a <2.5 V	Fallo a <2.5 V
Nº de Recargas	1000 aprox.	500 aprox.	1000 aprox.	4000 aprox.	5000 aprox.
T de descarga/mes	5 %	30 %	20 %	5 %	6 %
Tiempo de carga	8-16 h	10-14 h	2-4 h	2-4 h	1-1.5 h

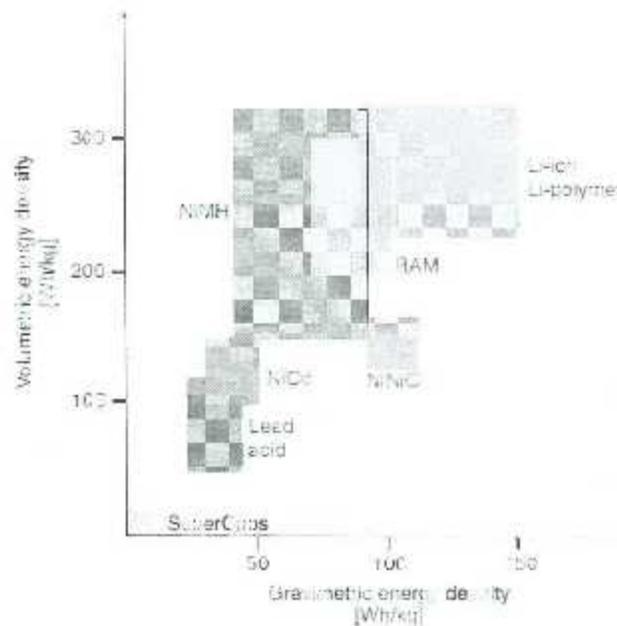


Figura 5.9 Gráfica representativa de la densidad de energía en las distintas baterías.

5.3.1 Comportamiento eléctrico de las baterías.

La parte eléctrica se puede representar como lo muestra la figura 5.10, consta de dos resistencias en paralelo y dos diodos en antiparalelo, una fuente ideal la cual está limitada por las resistencias y al final la tensión que puede brindar la batería. En la figura 5.11 se aprecia una gráfica con el comportamiento de las resistencias y el voltaje de la batería, en el eje horizontal está el porcentaje de carga (SOC) y el eje vertical la tensión. Se aprecia que la resistencia de carga aumenta conforme el porcentaje de carga, al aumentar la resistencia

se disminuye la corriente, caso contrario cuando la batería disminuye su porcentaje de carga la resistencia disminuye y por consecuencia aumenta la corriente.

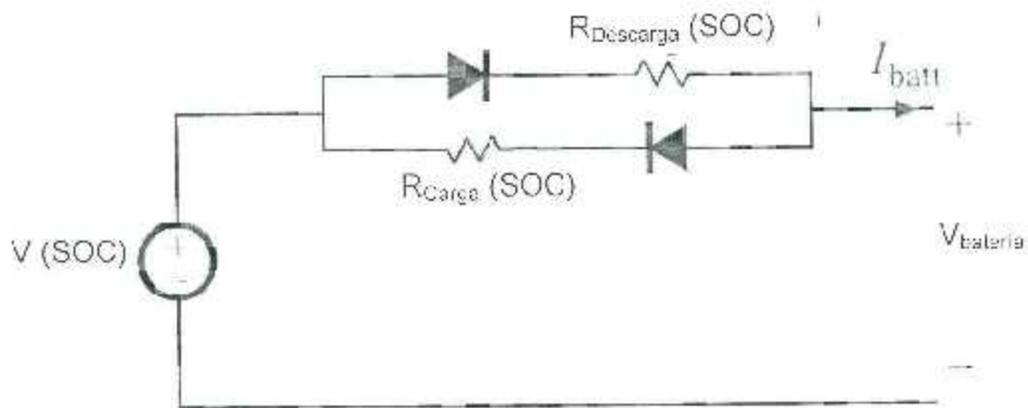


Figura 5.10 Diagrama eléctrico de las baterías.

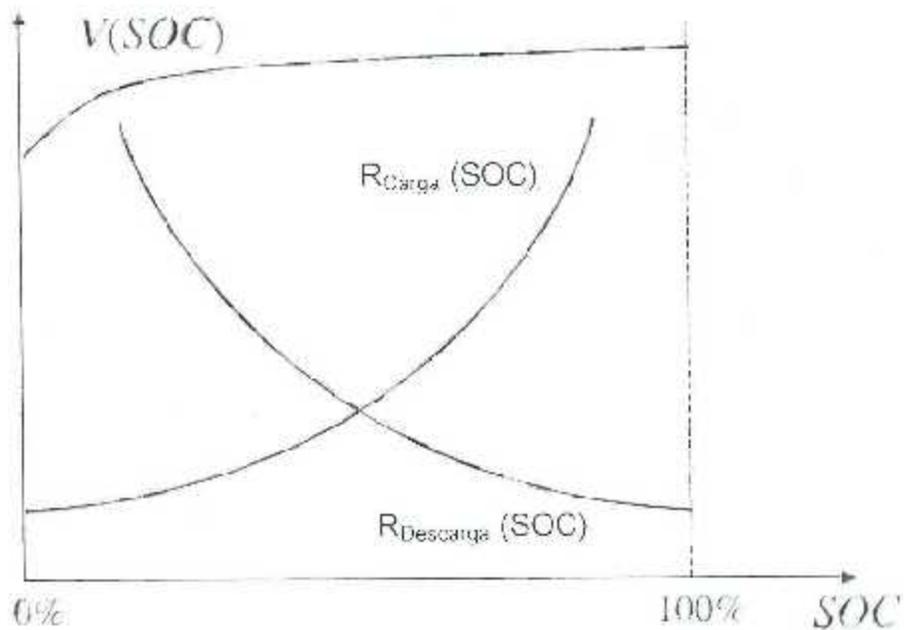


Figura 5.11 Diagrama eléctrico de las baterías.

5.3.2 Baterías de Plomo-Acido.

Fueron desarrolladas en 1859 por el físico francés Gastón Plante [34]. Esta constituida por dos electrodos de plomo, cuando la batería esta descargada se encuentra en forma de sulfato de plomo ($PbSO_4$) incrustado en una matriz de plomo metálico (Pb), el electrolito es una disolución de ácido sulfúrico.

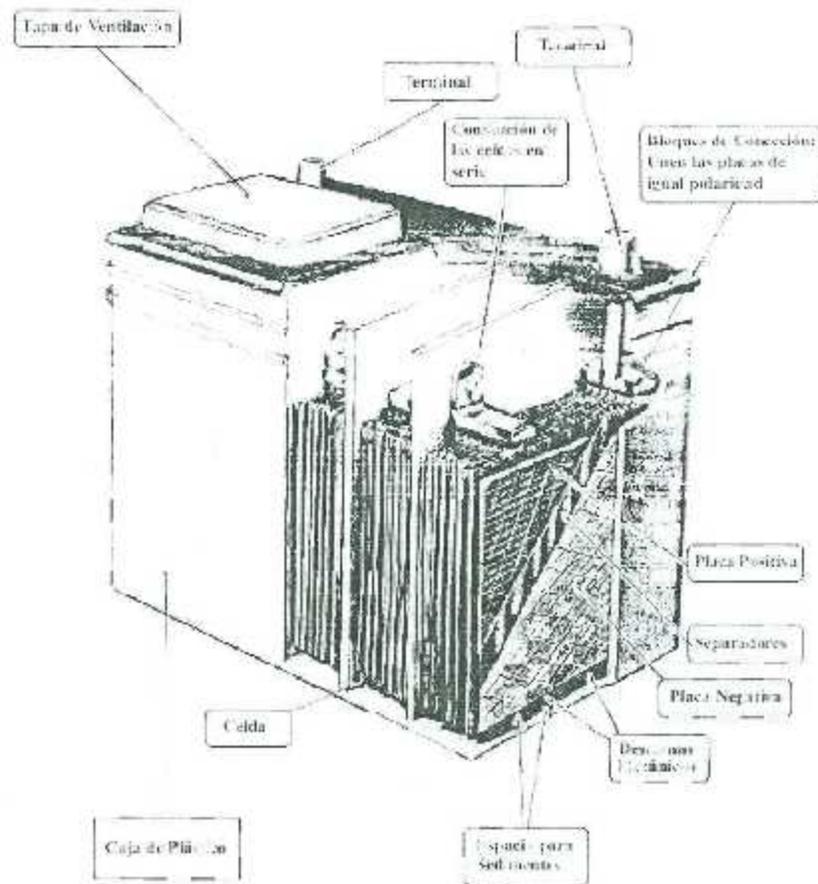


Figura 5.12 Estructura de una batería Plomo-Acido.

5.3.3 Regulador de carga.

El regulador de carga tiene como función fundamental impedir que la batería continúe recibiendo energía del panel una vez que ha alcanzado su carga máxima. Si la batería se continuara cargando se iniciarían procesos de gasificación o calentamiento que pueden llegar a ser peligrosos y acortarían la vida útil del acumulador. Otra función del regulador es la prevención de la sobrecarga con el fin de evitar que la carga de la batería se agote en

exceso, ya que ese fenómeno puede producir la disminución de la capacidad de carga de la batería en repetidos ciclos. Para esto se siguen desarrollando reguladores que aumenten la vida útil de la instalación solar basado en el rastreo de corriente máxima [39].

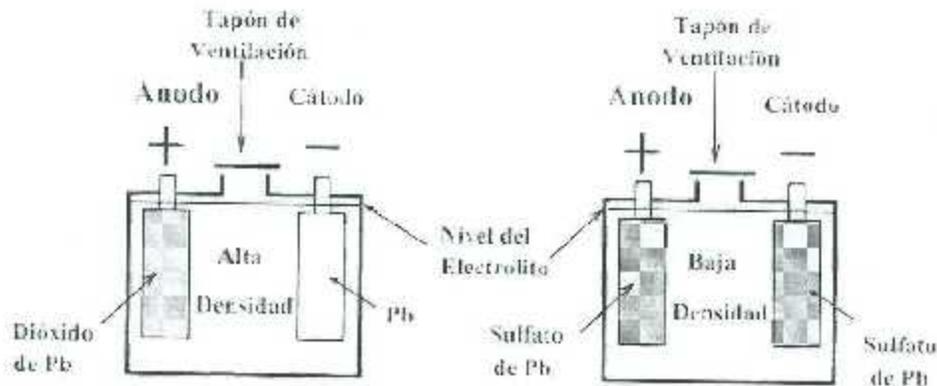


Figura 5.15 Comportamiento de los materiales ante la carga y la descarga

Tres parámetros definen una batería; la cantidad de energía que puede almacenar, la máxima corriente que puede entregar y la 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). La capacidad de una batería de sostener un régimen de descarga está dada por el número de Amperes-Hora (Ah). La profundidad de descarga representa la cantidad de energía que puede extraerse de una batería. Este valor está dado en forma porcentual. El voltaje de salida no permanece constante durante la carga ni la descarga. Dos variables determinan su valor, el estado de carga y la temperatura del electrolito, [36].

El comportamiento de corriente y voltaje con respecto al volumen de carga se puede apreciar en la figura 5.14 y corresponden al modelo 6FM100-X, es una batería de plomo ácido de 12v 100Ah [40], además en la fig. 5.15 se puede observar los ciclos en función de la profundidad de descarga.

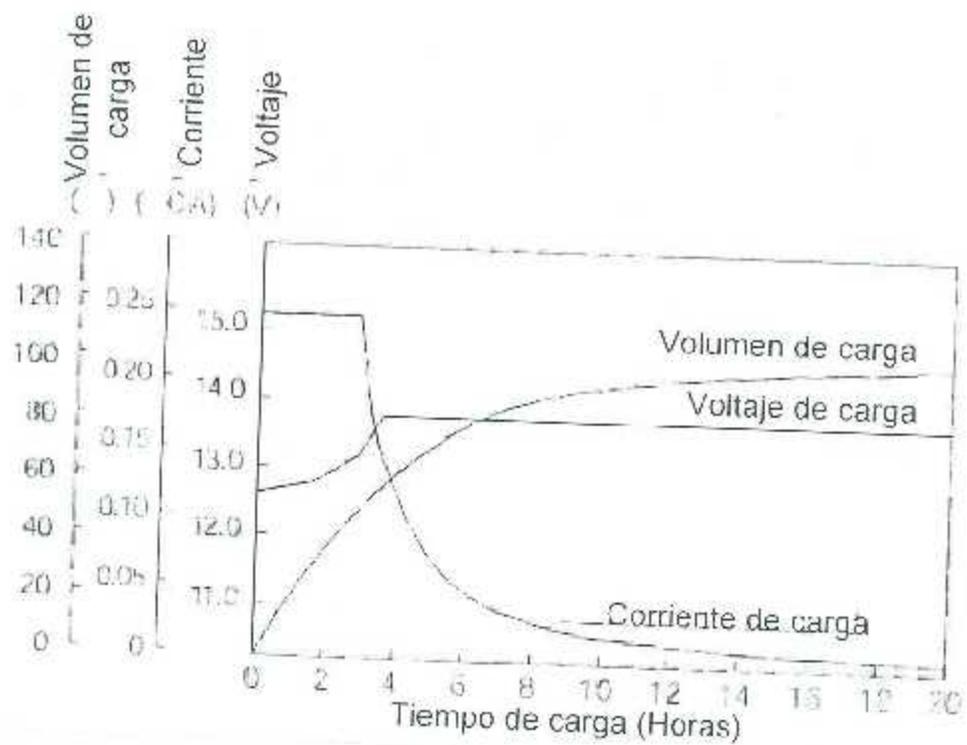


Figura 5.14 Comportamiento de la batería en estado de carga.

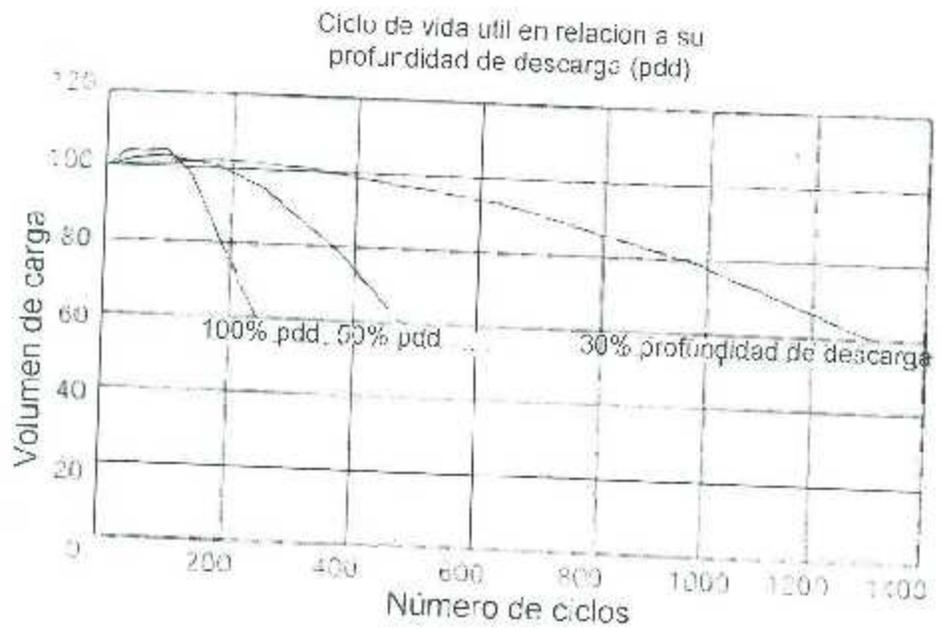


Figura 5.15 Ciclo de vida útil ante el porcentaje de descarga.

Capítulo 6

Modelado y simulación del Sistema de Bombeo

6.1 Introducción.

En este capítulo se presenta la simulación de los convertidores estáticos para variar la velocidad en un motor monofásico de baja potencia conectado a una bomba hidráulica centrífuga.

6.2 Modelado del motor monofásico.

Con los valores obtenidos de las pruebas al motor de inducción monofásico, se consideró la construcción del modelo matemático utilizando los parámetros del fabricante y parámetros de los devanados de [7], en conjunto con las ecuaciones de la máquina asimétrica mostradas en el capítulo 3. Para la simulación se utilizó el software MATLAB SIMULINK [1].

El simulador cuenta con un modelo de motor monofásico en el cual se introducen los valores de parámetros de alimentación, eléctricos y mecánicos. Este modelo tiene valores predefinidos que pueden ser modificados, fig. 6.1, pero se tiene la desventaja de que no es posible modificar aspectos de operación que lleguen a ser útiles para la etapa de simulación.

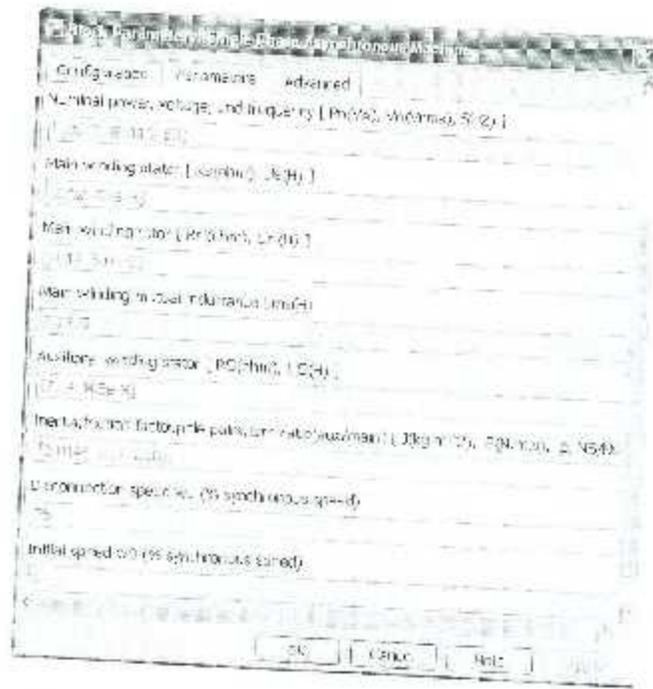


Figura 6.1 Parámetros del motor monofásico MATLAB-SIMULINK.

Con la intención de tener libertad para lograr modificaciones en la operación del modelo del motor monofásico de inducción con enfoque en la máquina bifásica asimétrica, se realizó la construcción del modelo como lo muestra la fig. 6.2, partiendo de las ecuaciones mostradas en el capítulo 3, [2].

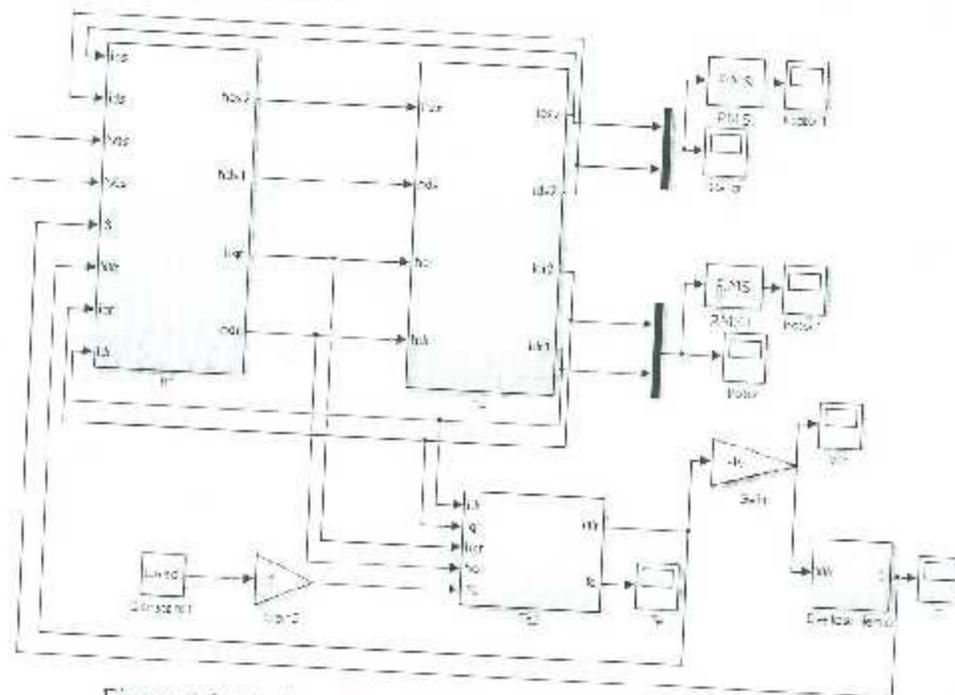


Figura 6.2. Modelo del Motor monofásico construido en SIMULINK.

6.3 Simulación Pulsador Reductor-Elevador.

Un pulsador reductor-elevador realiza la modificación del nivel de tensión además la inversión de polaridad del voltaje sin necesidad de transformador. Un gran número de aplicaciones cuentan con este tipo de reguladores, especialmente donde se encuentran celdas fotovoltaicas [2].

En la simulación del modelo del convertidor CD-CD elevador-reductor, se establecieron los siguientes valores

Tensión de alimentación = 48vcd.

Tensión de Salida = 130vcd.

Frecuencia de Conmutación = 10 kHz

Período de Conmutación = 100µs

Corriente = 6A.

$$\Delta I = (I_{superior} - I_{inferior}) = 0.3A$$

$$\Delta V = (V_{superior} - V_{inferior}) = 0.8V$$

La ganancia es:

$$G = \frac{\text{Tensión de Salida}}{\text{Tensión de alimentación}} = \frac{130v}{48v} = 2.70$$

De la tensión de entrada y de salida se obtuvo el ciclo útil:

$$D = \frac{r-1}{r} = \frac{2.70-1}{2.70} = 0.62$$

$$62\% \text{ de } 100 \mu s = 62 \mu s, t_1 = 62 \mu s, t_2 = 38 \mu s$$

$$\Delta I = \frac{V_i D}{fL}$$

$$L = \frac{V_s D}{\Delta_{if}}$$

$$L = \frac{(48)(0.62)}{(10000)(0.3)} = 992\text{mH}$$

$$\Delta_v = \frac{I_a K}{fC}$$

$$C = \frac{I_a k}{\Delta_v f}$$

$$C =$$

$$C = \frac{(6)(0.62)}{(0.8)(10000)} = 0.465\text{mF}$$

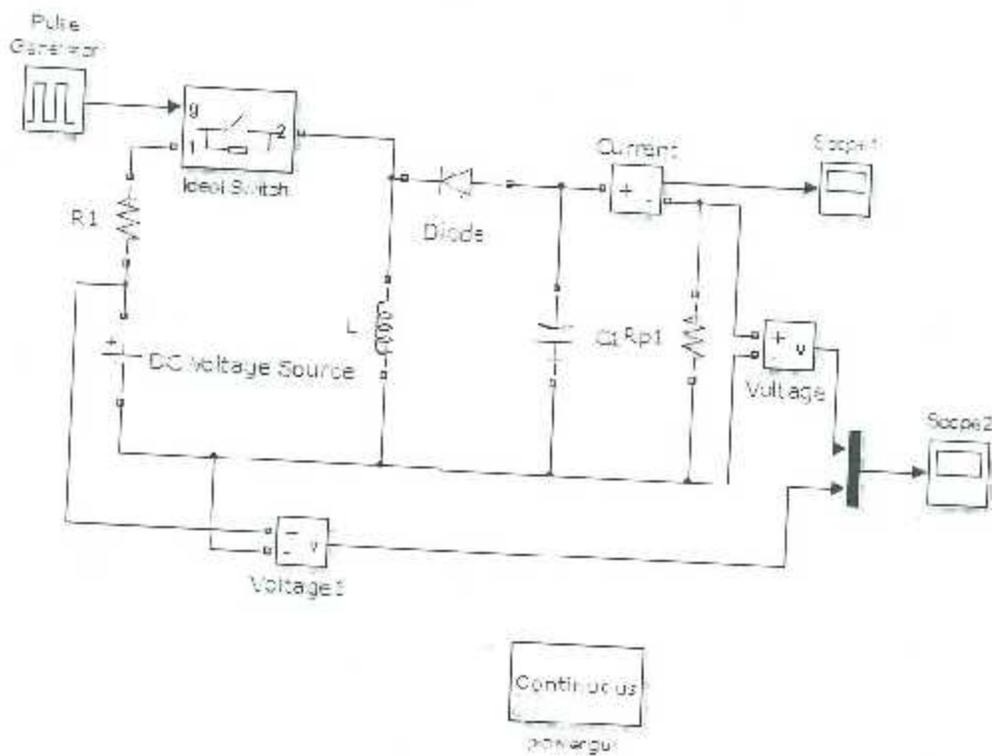


Figura 5.3 Modelado del convertidor en MATLAB-SIMULINK

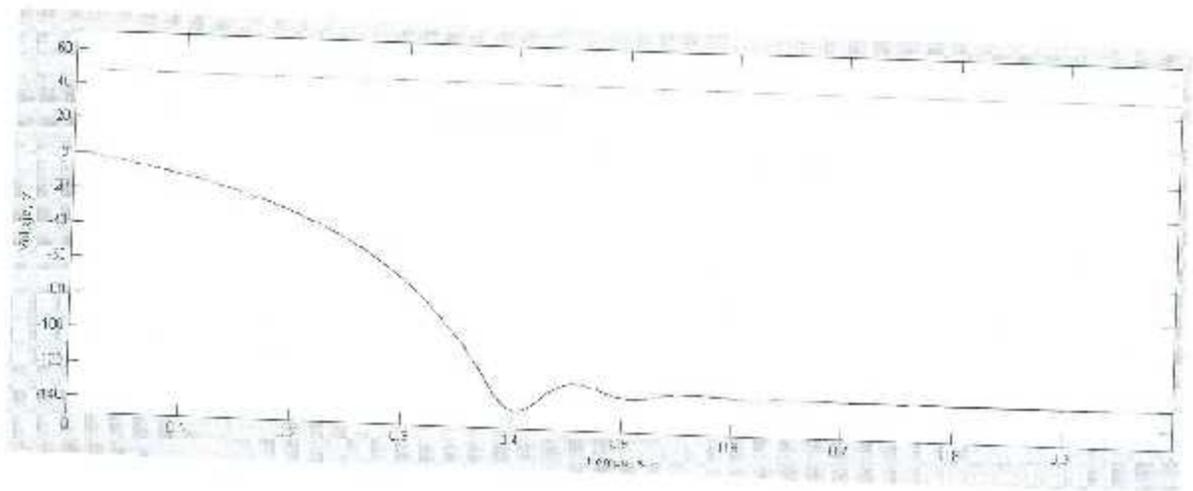


Figura 6.4 Gráfica de la tensión de entrada y tensión de salida en un pulsador reductor-elevador.

En la Fig. 6.4 se puede observar la tensión de salida y la tensión de entrada, donde el voltaje de salida cambia su polaridad llegando al valor de 130 volts. Se observa también que a los 0.4s se estabiliza la salida de tensión. El ciclo de trabajo establecido es de 62% llegando así al voltaje establecido en el diseño. Referente a la corriente que toma el convertidor, se considera una carga similar a lo que puede consumir el equipo de bombeo con la finalidad de evaluar el comportamiento del convertidor. La gráfica de corriente se observa en la figura 6.5.

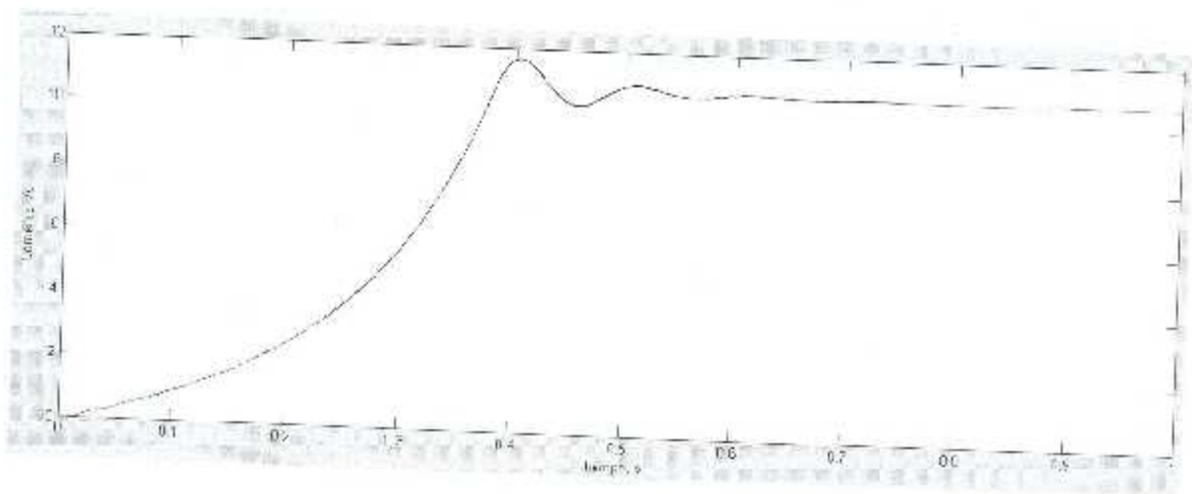


Figura 6.5 Gráfica de la corriente en la carga de un pulsador.

6.4 Simulación y diseño de etapa de disparos del inversor.

Se construyeron dos inversores monofásicos de puente completo para alimentar las bobinas principal y auxiliar del motor de inducción monofásico, con la finalidad de tener variación de velocidad mediante la modificación de la frecuencia y la tensión de alimentación. Inicialmente se desarrollaron modelos computacionales de los inversores en conjunto con la lógica de disparos utilizando Matlab/Simulink/Power System Blockset y para probar la lógica de disparos que se programó en un microcontrolador, se empleó el software ARES-PROTEUS. La técnica de disparos utilizada para la conmutación de los interruptores electrónicos es por variación sinusoidal de ancho de pulso, visto en el capítulo 4, en la figura 6.6 se puede apreciar la lógica de disparos que se emplea en el modelo del inversor. Por otra parte en la gráfica de la figura 6.7 se tienen la señales de disparo que irían a la compuerta de los dispositivos de potencia, en este caso se utilizaron IGBT's.

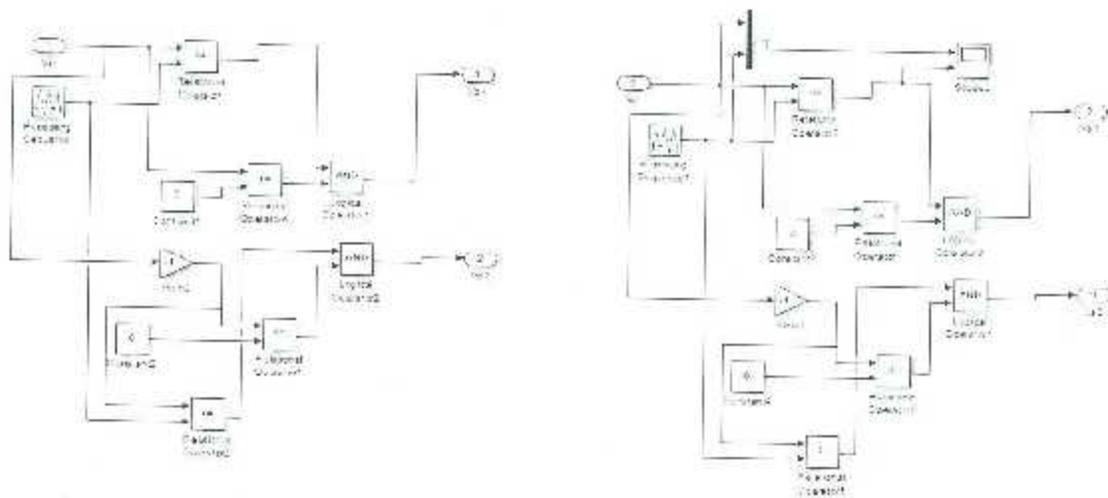


Fig. 6.6 Lógica de disparos del inversor en MATLAB-Simulink.

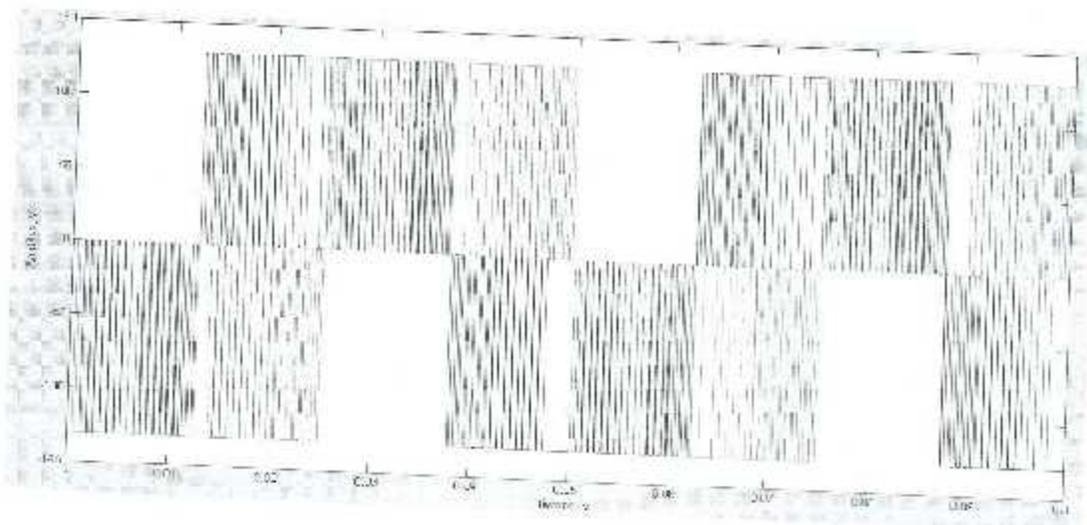


Figura 6.7 Disparos de los inversores con un desfase de 90° eléctricos.

Los pulsos positivos constituyen una rama y los negativos la otra. En esta imagen se pueden observar V_p y V_a .

6.4.1 Modelo de bloques del inversor en Matlab/Simulink

Para la etapa de potencia se utilizaron IGBT's GB10B60KD [8] de la compañía International Rectifier. Se construyeron dos inversores tipo puente de onda completa para alimentar con tensión las bobinas principal (V_p) y auxiliar (V_a), fig 6.8.

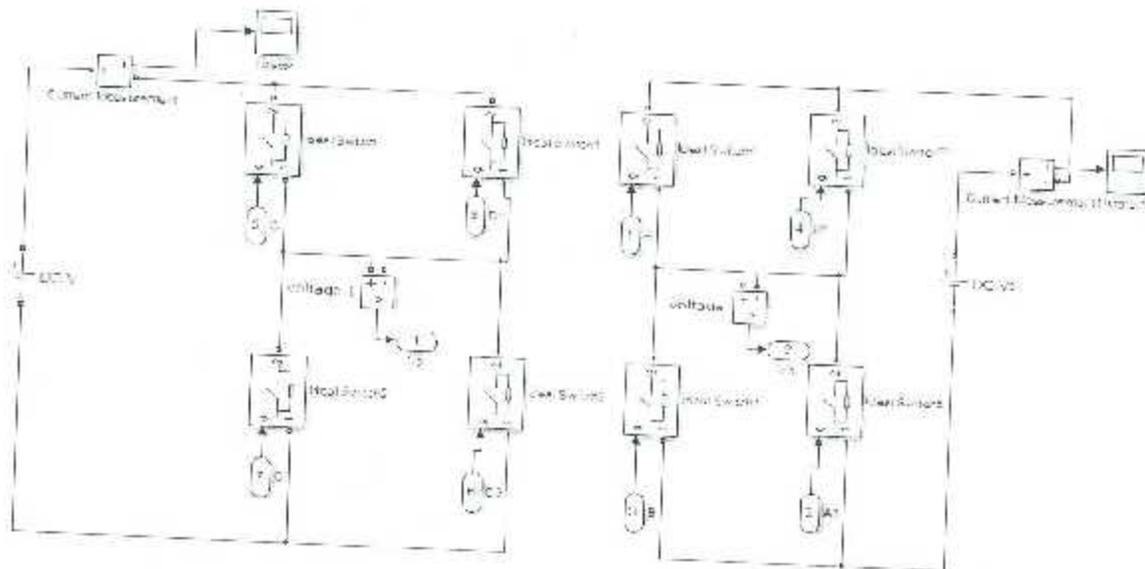


Fig. 6.8 Inversores tipo puente de onda completa para el devanado principal y auxiliar del motor de inducción.

6.5 Generación FV y Almacenamiento de energía

Para esta etapa se construyó un pequeño sistema fotovoltaico incluyendo una batería para cumplir con las características de 2 ejemplos de riego. Para evaluar este sistema de generación y almacenamiento de energía, se simula una carga equivalente al comportamiento del motor de inducción de la bomba empleada en el proyecto. Para desarrollar este modelo se utilizó MATLAB-SIMULINK como se muestra en la fig. 6.9.

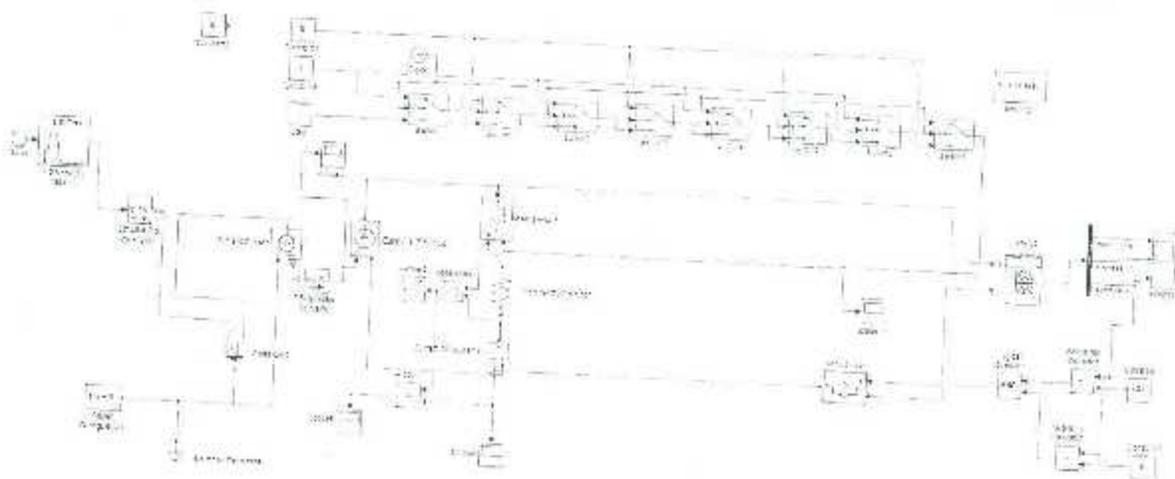


Fig.6.9 Modelo de la etapa de generación y almacenamiento de energía.

Se realizaron dos ejemplos de simulación para observar el comportamiento de la carga-descarga de la batería y el funcionamiento de las celdas, por lo que se dimensionó según la necesidad de la moto-bomba empleada en el invernadero y el tipo de plantación a regar.

6.5.1 BATERÍA DE 48V, 50 A-H Y CELDA FV DE 50W

Se trata el riego en un invernadero de planta de nochebuena, la cual es una planta que le afectan las altas temperaturas, así como la alta irradiación del sol. Para esta planta se recomienda que se riegue por la noche para evitar la evaporación y el daño a la plantación. Para este ejemplo se comienza el riego a las 6 pm, luego 8 pm, 10 pm y 1 am. Tres riegos con una duración de 30 min y el último riego de 90 minutos. En la figura 6.10 se observa la potencia entregada por las baterías en los respectivos tiempos necesarios. Se aseguró quedara en los valores necesarios de potencia para cumplir los 4 riegos.

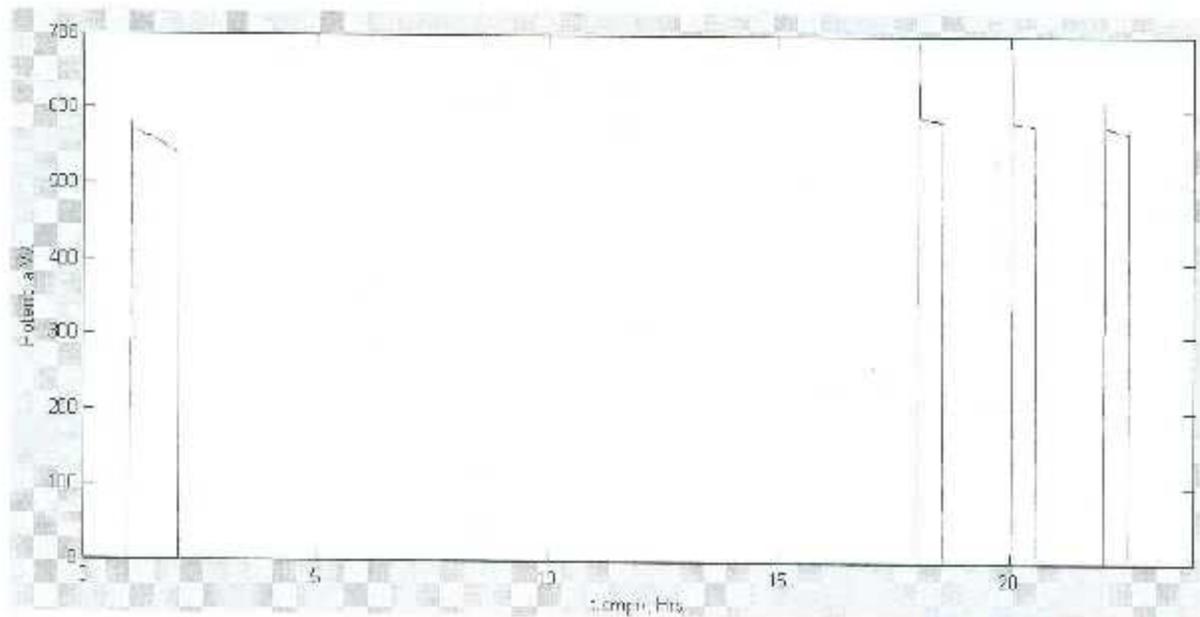


Figura 6.10 Potencia entregada hacia los inversores que alimentan al motor de inducción a diferentes horas del día.

En la figura 6.11 se realiza una comparación con la irradiación solar y el ciclo de carga de la batería. Se ajustó el sistema para que el porcentaje de carga de la batería sea el mismo al iniciar y finalizar el proceso de carga y descarga, con la intención de simular el tiempo de carga que requiere para completar el 100% y con esto asegurar día tras día su carga completa. La línea azul es la irradiación solar y la línea verde el porcentaje de carga. En la figura 6.12 se aprecia una circulación de corriente en la batería, dicha corriente negativa significa que la batería está cargándose por los módulos FV, y la corriente positiva significa que la batería está entregando potencia hacia el motor de inducción.

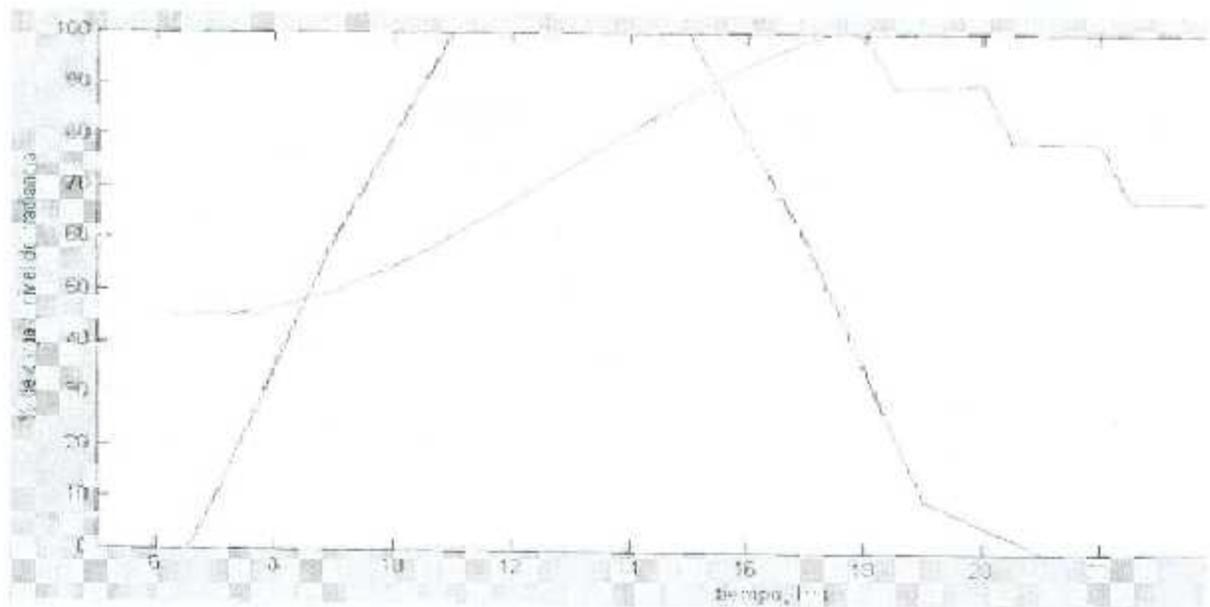


Figura 6.11 Gráfica de Porcentaje de carga e irradiación solar a diferentes horas del día.

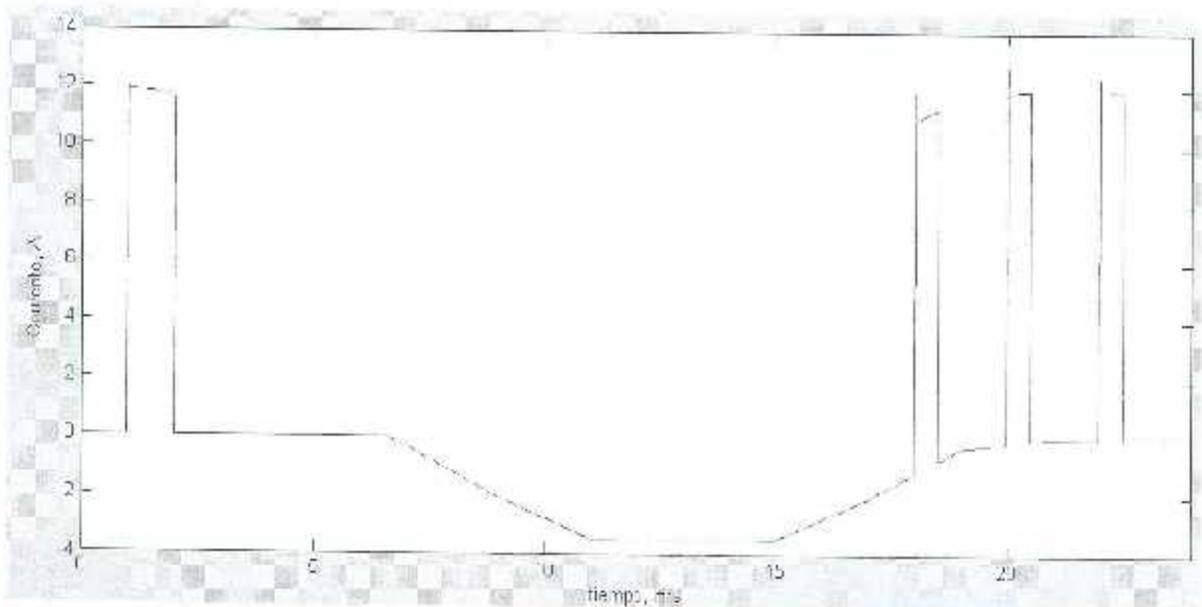


Figura 6.12 Gráfica de Corriente de la batería a diferentes horas del día.

6.5.2 BATERÍA DE 48V, 100 A-H Y CELDA FV DE 60W

En el siguiente caso se trató un invernadero de tomate, el cual tiene un requerimiento de 5 riegos diarios, el primero a las 7am luego 9am, 11am, 1pm y 4pm. Se propuso un panel

fotovoltaico de 60 w y una batería de 48 v con una capacidad de 100 Ah. En la figura 6.13 se aprecian los tiempos de riego y la potencia entregada hacia el inversor.

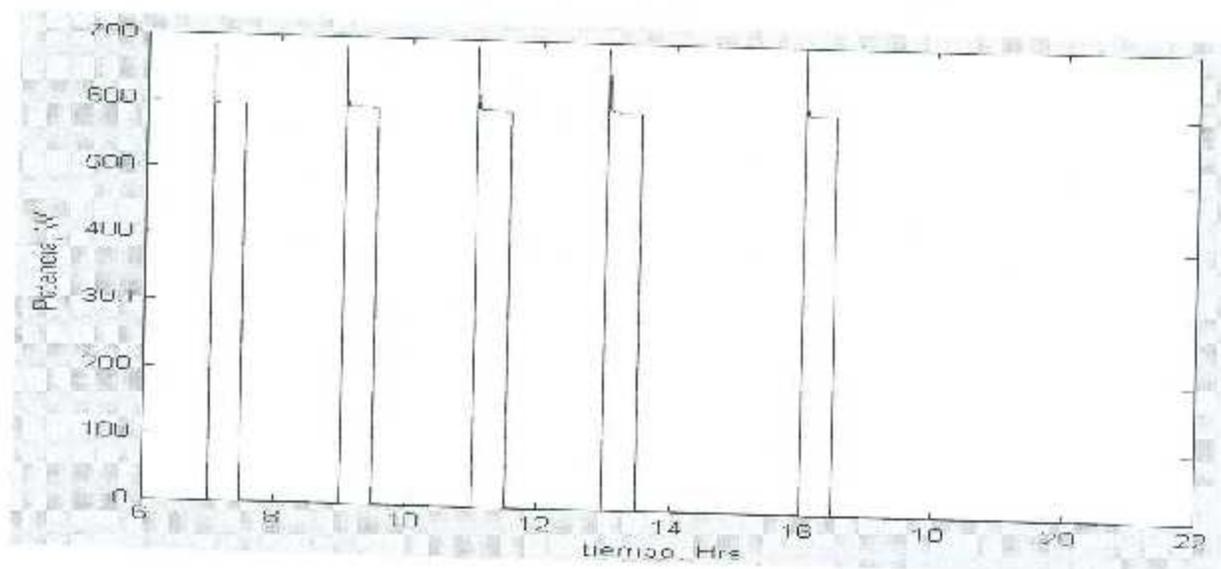


Figura 6.13 Potencia entregada hacia el inversor a diferentes horas del día.

En la figura 6.14 se puede apreciar el porcentaje de carga de la batería, vemos que arranca y termina con el 100 % con la energía que expide la fotocelda. En la figura 6.15 se aprecia el sentido de la corriente, cuando la corriente es negativa sucede que la corriente fluye hacia la batería, cuando es positiva la corriente fluye hacia la carga. Por último en la figura 6.16 se aprecia el comportamiento del voltaje.

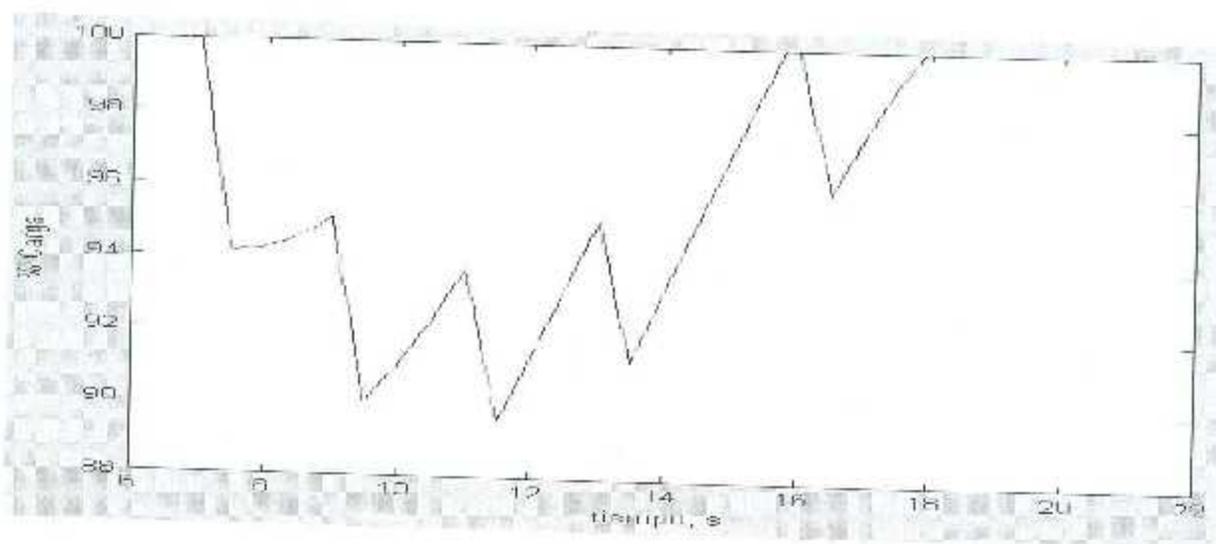


Figura 6.14 Porcentaje de carga de la batería.

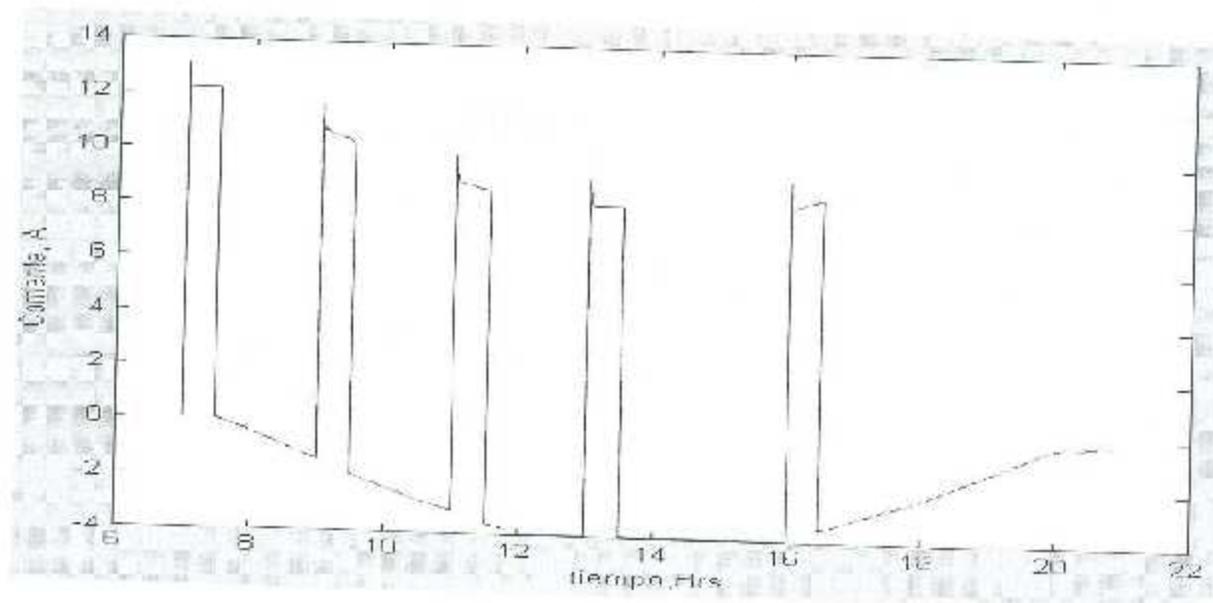


Figura 6.15 Corriente en la batería.

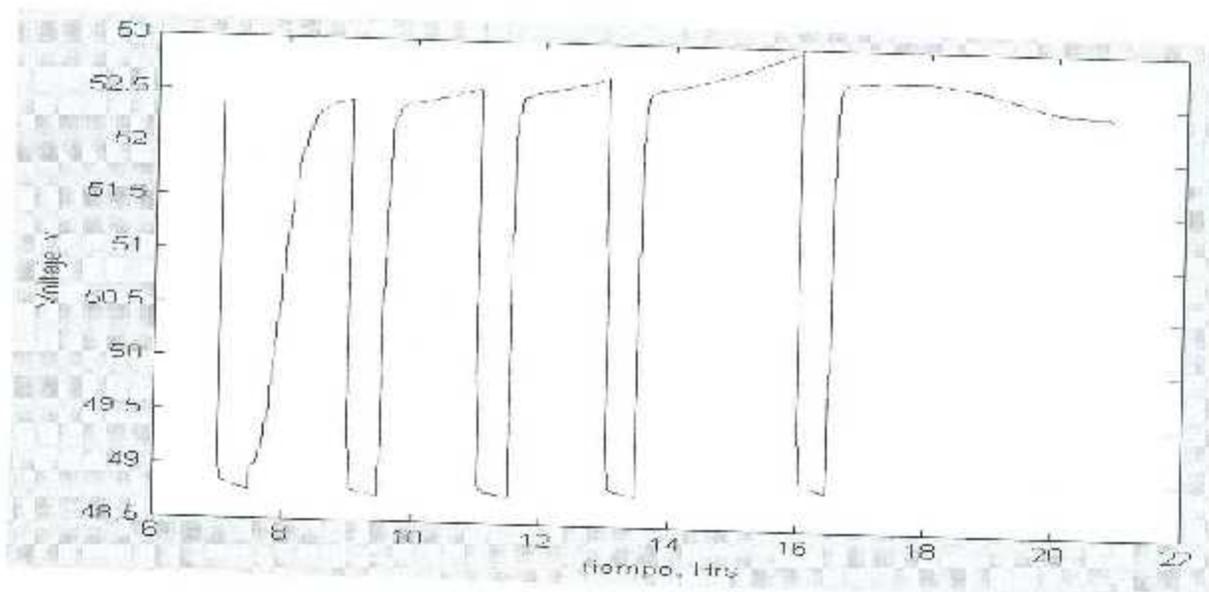


Figura 6.16 Voltaje en la batería.

6.6 Simulación del sistema de bombeo.

Para llevar a cabo esta simulación se integraron todos los elementos que conforman al sistema de bombeo: el panel fotovoltaico, el acoplamiento de la etapa de disparos, la etapa del trocador buck-boost, la etapa del inversor, el modelo del motor bifásico asimétrico y la simulación de la etapa bombeo. Primero se hicieron simulaciones a lazo abierto, y una vez

que respondió de la forma deseada se procedió a construir un sistema de lazo cerrado. Como el único sensor con el que se contaba era el caudalímetro se simuló también el sensor y de aquí se obtuvo la retroalimentación, mediante un lazo PI. En la figura 6.17 se puede apreciar el modelo completo en MATLAB-SIMULINK. Para el control PI se utilizó el bloque de simulink lo que simplificó los cálculos. Los valores de las constantes K_p y K_i se obtuvieron mediante el método de Ziegler-Nichels.

Para la construcción de la tubería se utilizaron bloques de Matlab hidráulico [9], se tomó una tubería con una longitud de 30 m. Se colocaron dos depósitos: uno de los depósitos era el que surtía al otro con la ayuda de la bomba. Se conectó la flecha del modelo del motor al impelente de la bomba centrífuga. Se realizaron varias pruebas a diferentes requerimientos de gasto de agua los cuales se pueden apreciar en las figuras 6.18 y 6.19

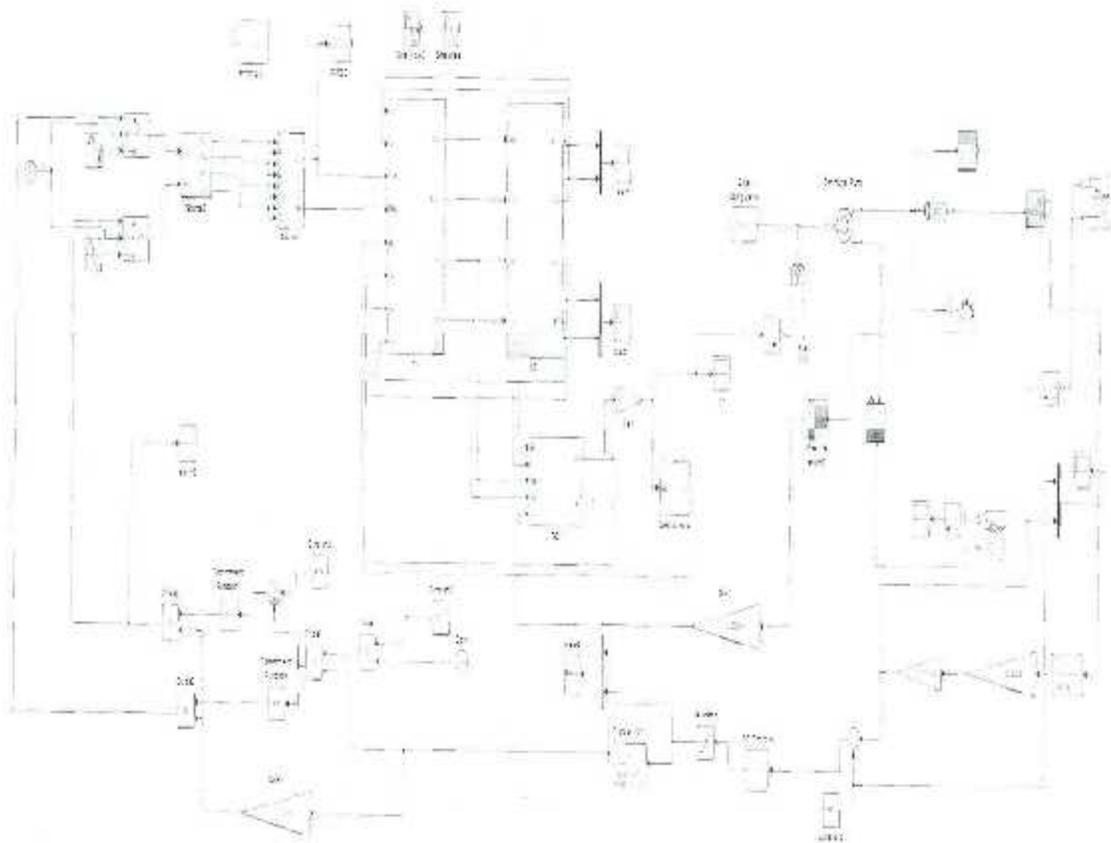


Figura 6.17 Modelo completo del sistema de bombeo en MATLAB-SIMULINK.

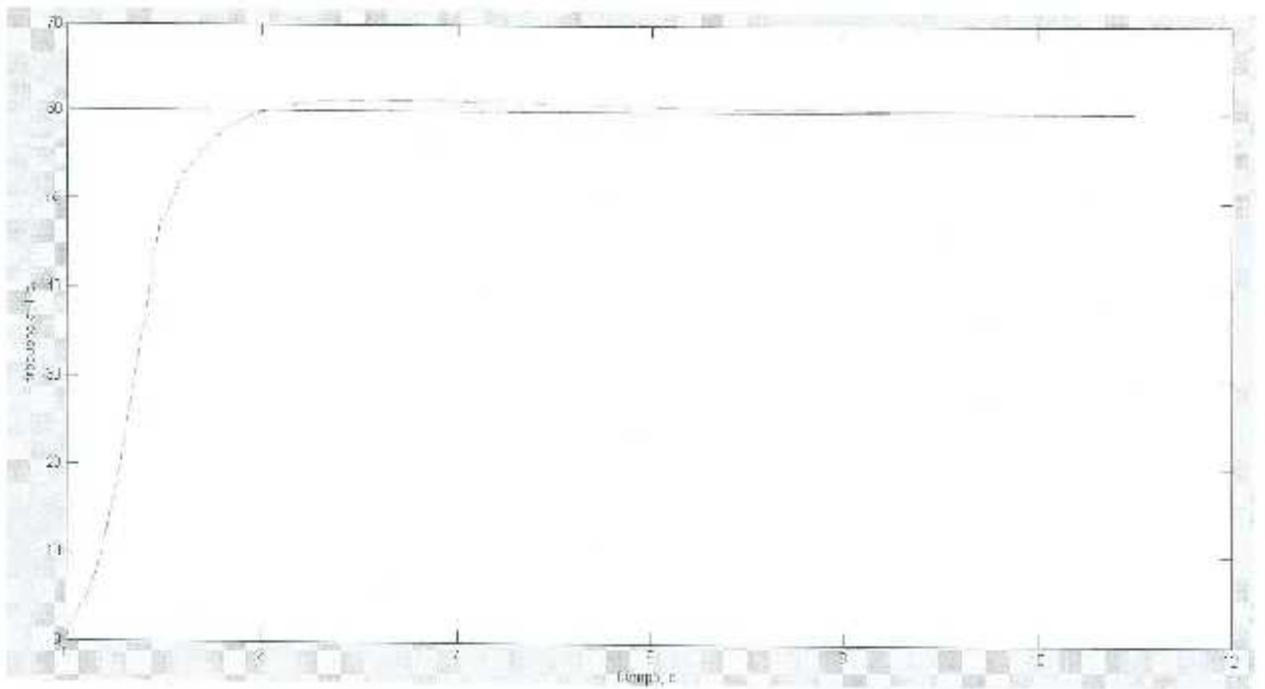


Figura 6.18 Respuesta al control con referencia de frecuencia a 60 Hz

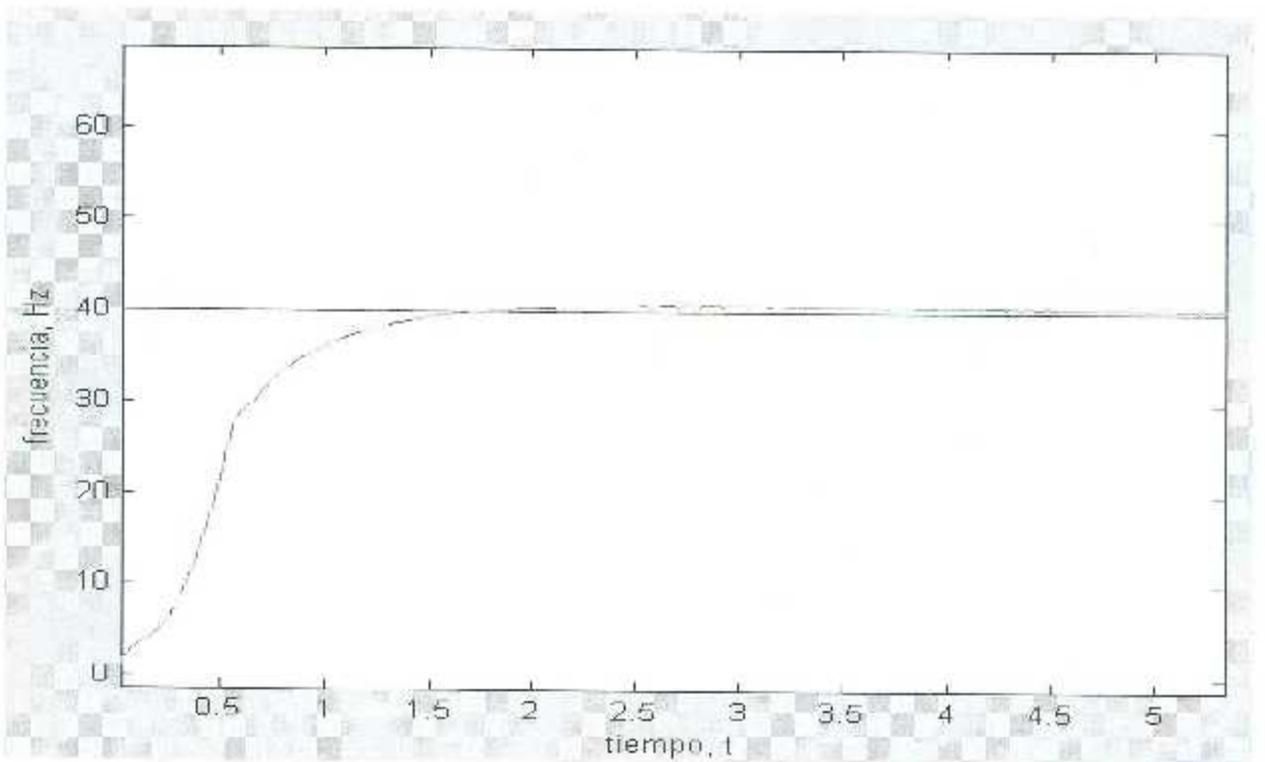


Figura 6.19 Respuesta al control

Con el dato de caudal de líquido para establecer la velocidad requerida del motor, se utilizaron las leyes de afinidad. Con estas leyes se estimó la velocidad requerida para cada caudal descudo. Los resultados se pueden apreciar en las figuras 6.20 y 6.21

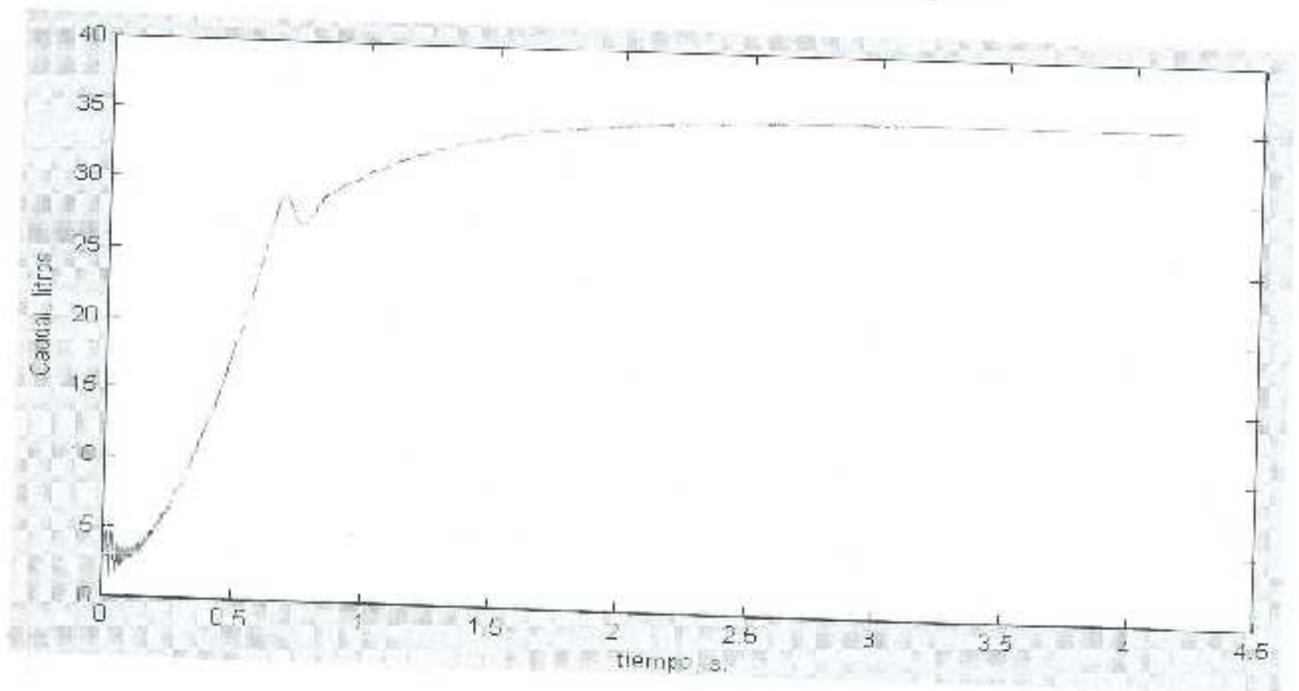


Figura 6.20 Comportamiento ante 35 litros por minuto.

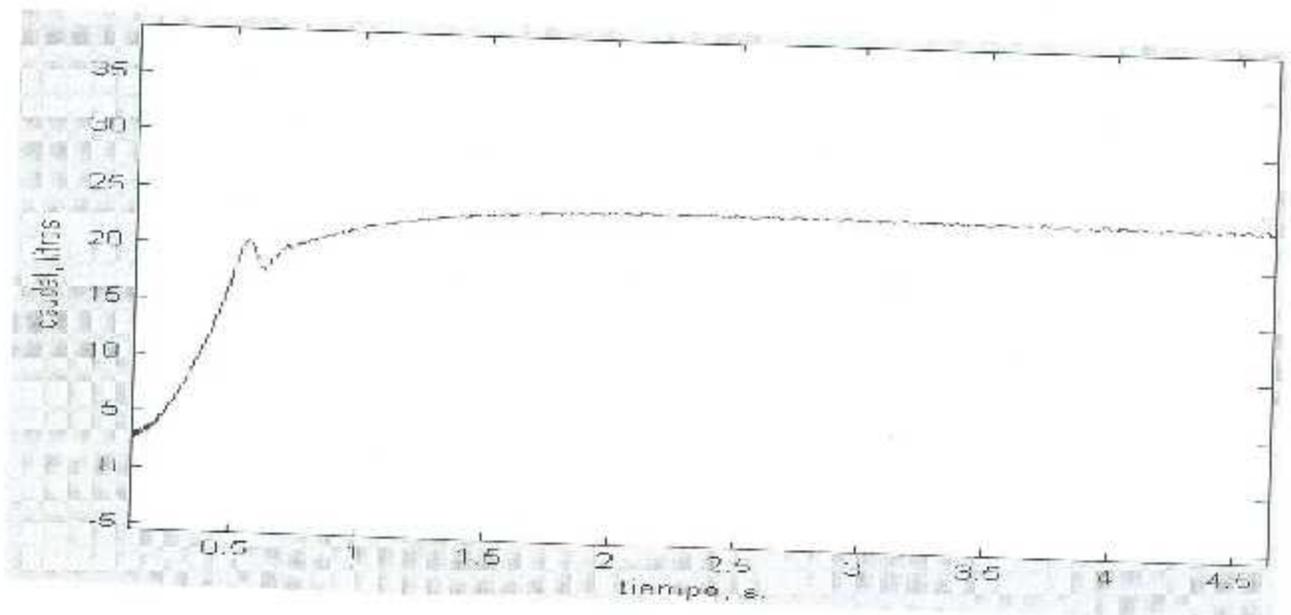


Figura 6.21 Comportamiento ante 24 litros por minuto.

Se realizó una perturbación al colocarse un conector "T" en la tubería junto con una electroválvula que se abre al tiempo de 5 segundos, permitiendo la salida del flujo de agua. Como era de esperarse, en ese instante el flujo de agua se redujo por la tubería principal pero al transcurrir 4 segundos volvió a establecerse en el flujo deseado como lo muestra la gráfica 6.22

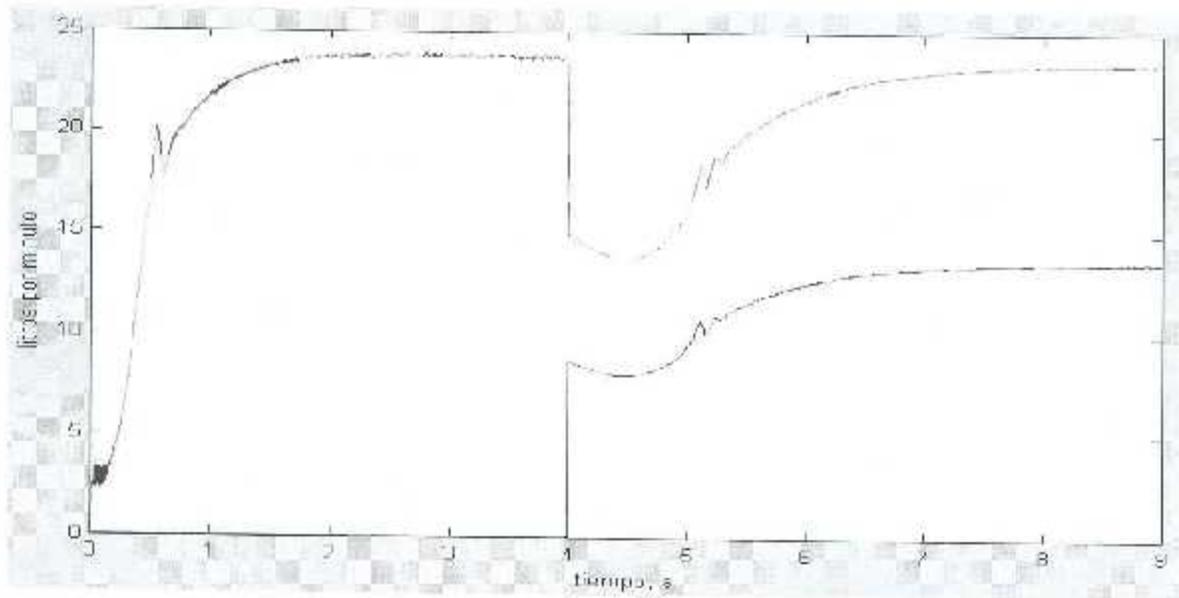


Figura 6.22 Comportamiento del sistema de bombeo ante una perturbación.

Se puede apreciar en las simulaciones que el sistema de bombeo tratará de mantener el flujo del líquido al volumen establecido figura 6 23, a pesar de las perturbaciones como la salida de líquido de la tubería por una bifurcación Tee, la cual se encuentra entre la bomba y el sensor de caudal. Esto puede representar que el sistema en realidad gaste más agua para mantener el flujo hacia la plantación, lo que implica una desventaja en gasto de agua. Por otro lado, se puede establecer un esquema de control en donde solo se esté monitoreando al flujo de agua a la salida del equipo de bombeo.

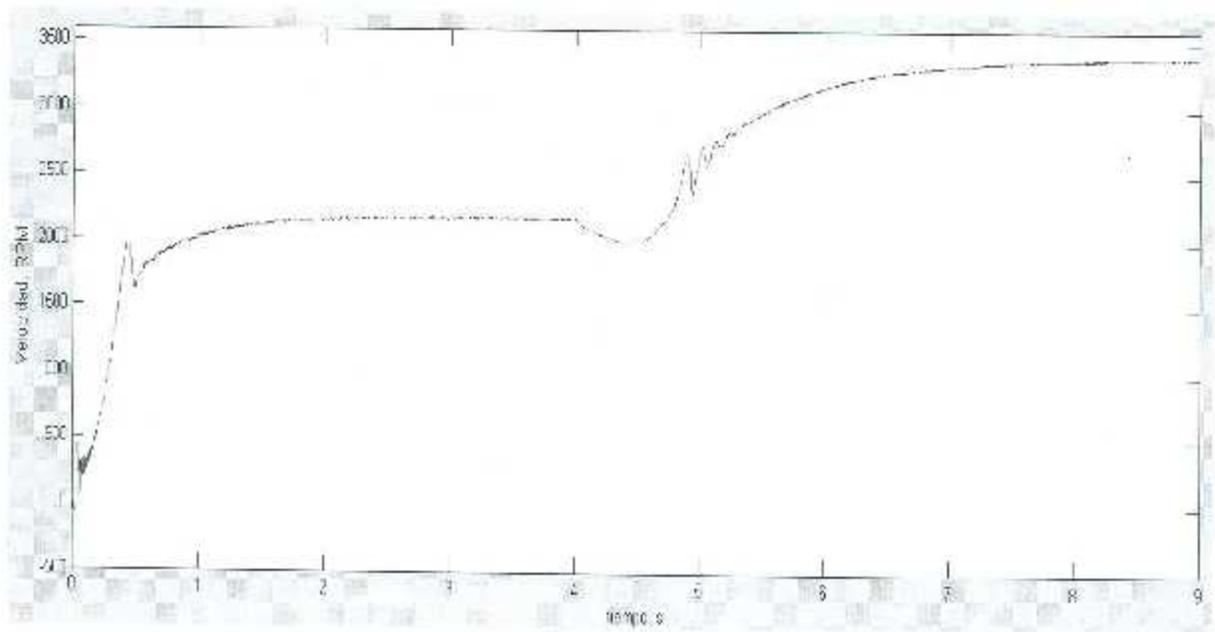


Figura 6.23 Velocidad del motor debido a la perturbación aplicada.

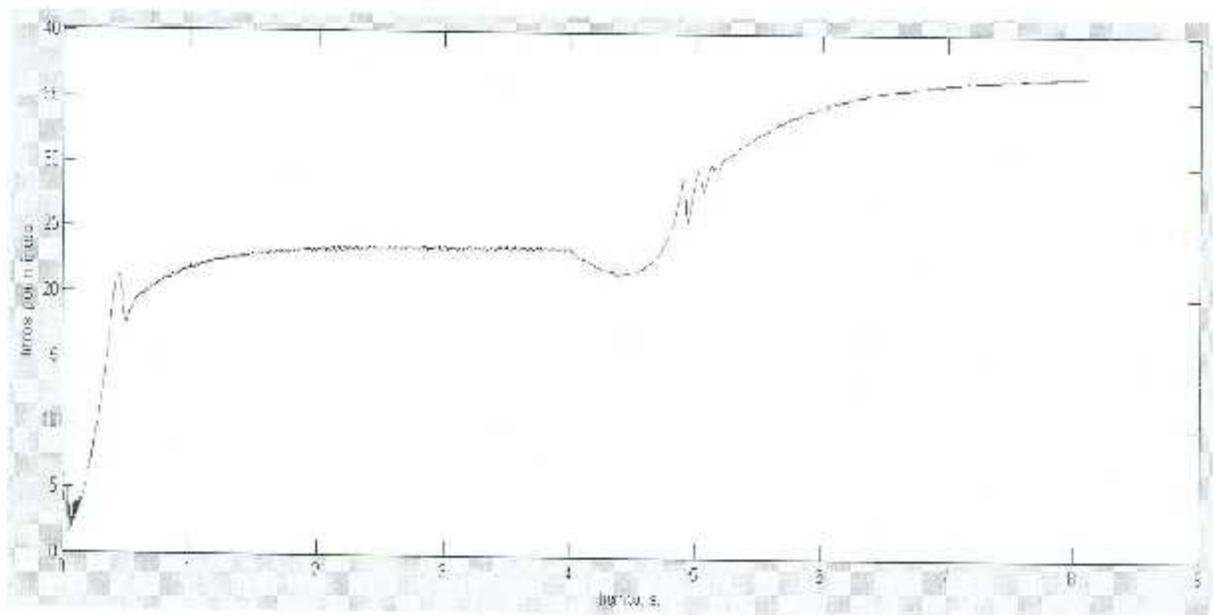


Figura 6.24 Litros por minuto a la salida de la bomba debido a la perturbación aplicada.

El fabricante en su hoja de datos dice que el máximo gasto de agua es de 34 litros por minuto a velocidad nominal del motor. Para ver el comportamiento de la bomba a sobre velocidad se le pidió a la bomba un gasto de agua de 35 litros por minuto y a los 4 segundos se abre la conexión Tee como se ve en la figura 6.25. El sistema de control al ver la caída de flujo en la línea de riego principal acelera el motor pero ya no alcanza a entregar

los 35 litros por minuto, los mas que puede entregar son 30. El caudal máximo se aprecia en la figura 6.26.

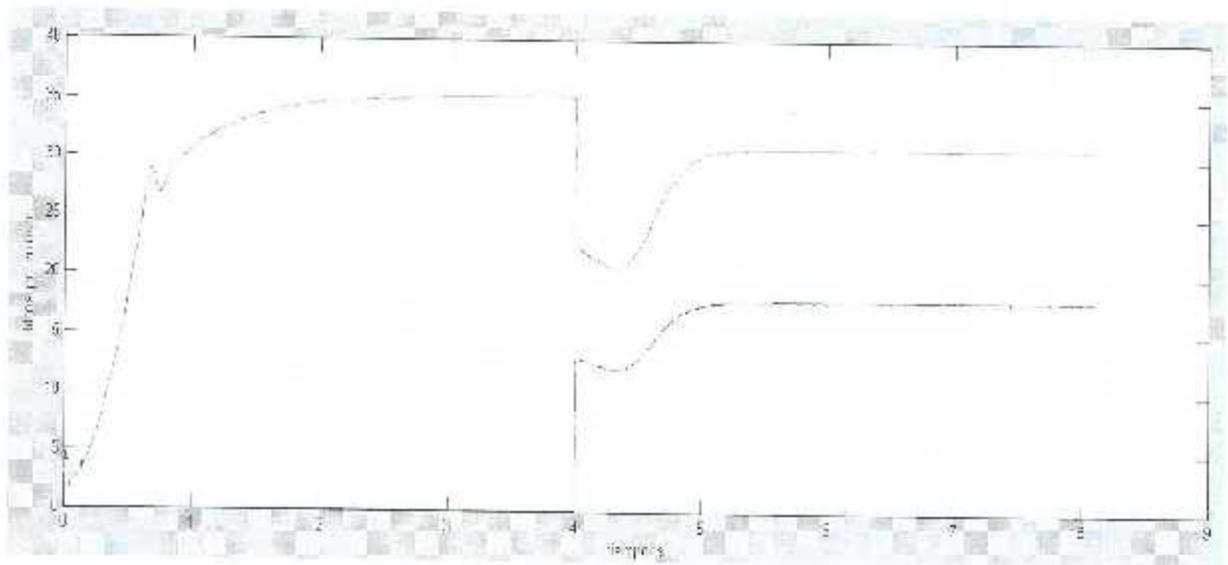


Figura 6.24 Comportamiento del sistema de bombeo a 35 litros por minuto y una perturbación a los 4 s.

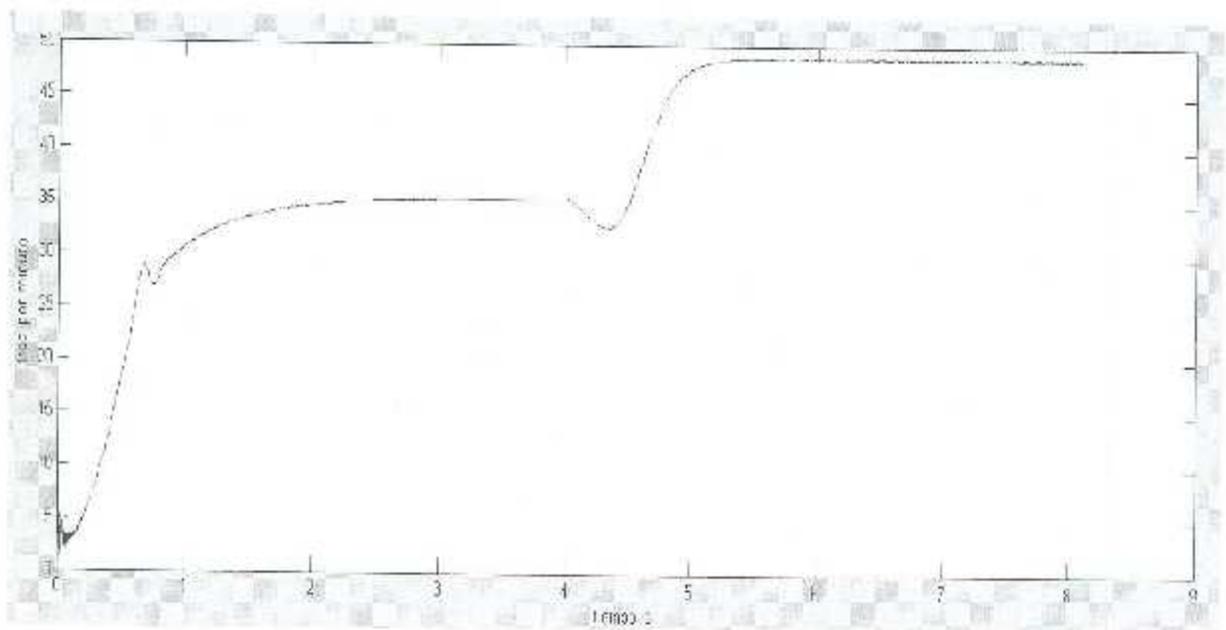


Figura 6.26 Litros por minuto máximos a la salida de la bomba.

Capítulo 7

Resultados Prácticos del Sistema de Bombeo.

7.1 Introducción.

En este capítulo se presenta el desarrollo de la construcción del sistema de bombeo. Construcción de los convertidores estáticos para variar la velocidad en un motor monofásico. Se expondrán pruebas de laboratorio, se analizarán los resultados prácticos y se compararán con los resultados del simulador.

7.2 Características de la Moto Bomba Monofásica.

7.2.1 Parámetros de la moto-bomba

En lo que respecta al motor monofásico, se utilizó un motor comercial de la marca AquaPack. Este motor es maquinado con arranque por capacitor, su voltaje es de 127v nominales y tiene una potencia de ½ hp. La información que proporciona el vendedor se puede ver en la tabla 7.1.

Tabla 7.1. Ficha técnica de la moto-bomba comercial.

CÓDIGO	HP	CV	Ampl	VOLTAJE	CAPACITOR	TUBERÍA	TANQUE	PRESIÓN	GASTO (l/min)				
				Volts	µF	Ø (mm)	RECOMENDADO	AL	10m	15m	20m	25m	30m
AP-4	0.5	0.37	5	127	20	1" x 1"	1.35"	34 / 40	74	15	8	5.5	3.5

El comportamiento la bomba se puede apreciar en la fig. 7.1, donde se utilizó la moto-bomba Aquapack modelo AP-4.

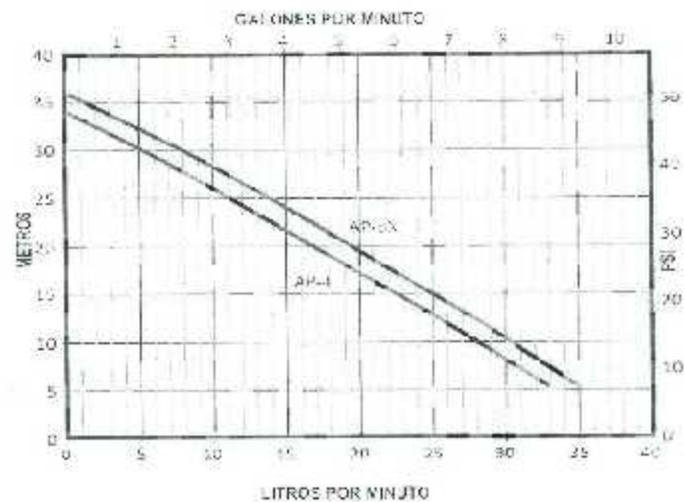


Figura 7.1 Gráfica del comportamiento de la bomba centrífuga.

Se utiliza un sensor de efecto Hall que mide el caudal con la finalidad de obtener la relación de velocidad contra flujo de agua, fig. 7.2. Al fluir el agua a través del sensor se obtiene una serie de pulsos que está en relación directa con el flujo de agua. Ese proceso se monitoreó empleando LabVIEW y una tarjeta de adquisición de datos, mostrando el resultado en la figura 7.3.



Figura 7.2 Sensor de caudal

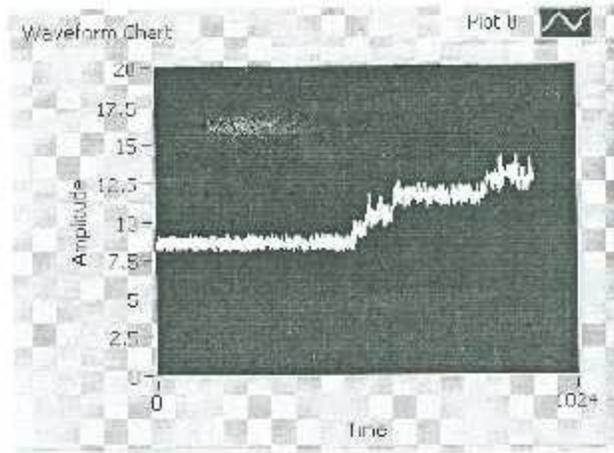


Figura 7.3 Gráfica obtenida del sensor de flujo mediante LabVIEW

7.2.2 Consideraciones de adecuación del motor monofásico

Una vez que se seleccionó el motor, se procedió a adaptarlo al proyecto. Los motores de arranque por capacitor tienen un punto en común entre sus bobinas. Para el proyecto se requiere que las dos bobinas del motor de inducción estén eléctricamente aisladas con la finalidad de manejarlo como un motor bifásico asimétrico. Para cumplir con esta característica se desarmó el motor para separar las bobinas una de otra como lo muestra la figura 7.4. En la figura 7.5 se aprecia el motor una vez que se separaron las bobinas.

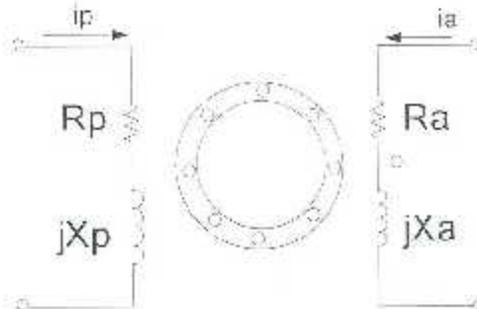


Figura 7.4. Diagrama eléctrico del motor bifásico asimétrico.

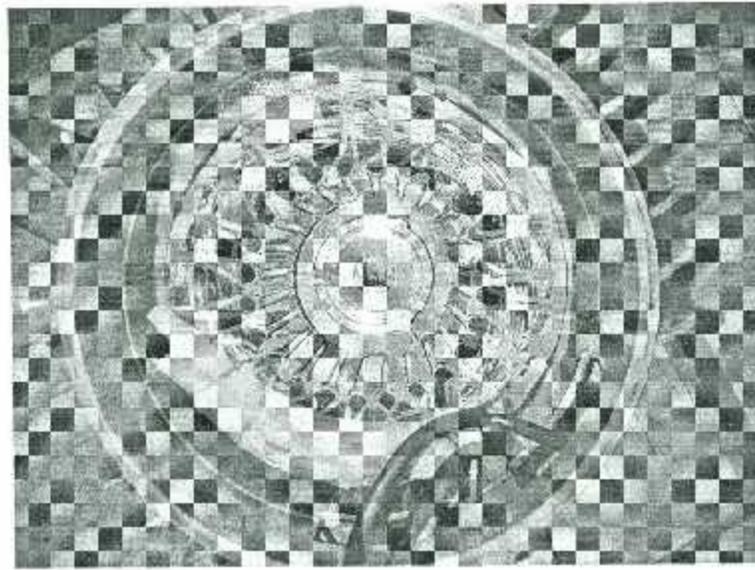


Figura 7.5. Imagen del motor monofásico después de aislar sus bobinas eléctricamente.

Una vez que se tiene acceso independiente a las dos bobinas del motor de inducción, se procede a la conexión de dos inversores monofásicos que proporcionarán una alimentación ortogonal para obtener un par de arranque adecuado. Dado que este motor de inducción es de arranque por capacitor, la bobina auxiliar recibe una tensión desfasada casi 90° con respecto a la tensión de alimentación de la bobina principal. Por ello, los inversores están condicionados a operar a 90° de desfase fig. 7.6. Cabe mencionar que la condición de ortogonalidad de los inversores para alimentar al motor en forma bifásica no es muy estricta, debido a que la alimentación a través del capacitor proporciona un desfaseamiento por debajo de los 90° , pero la magnitud del par de arranque si se ve disminuido.

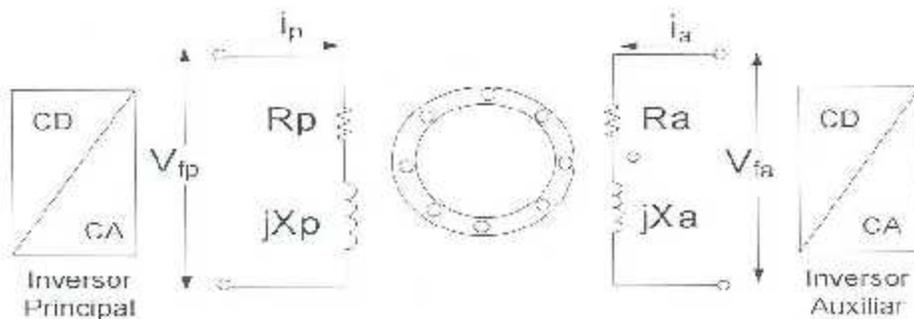


Figura 7.6. Imagen del motor bifásico alimentado por dos inversores monofásicos.

Con esta topología propuesta, es posible modificar la velocidad del motor al variar la frecuencia de salida de los inversores, pero también se puede lograr la disminución de velocidad al disminuir el ángulo de desfase entre ambos inversores cuando se encuentra en operación. De la misma manera se puede lograr que el motor cambie su sentido de giro, al desfase los inversores de $+90^\circ$ a -90° , lo cual le agrega un beneficio a esta topología propuesta, figuras 7.7 y 7.8

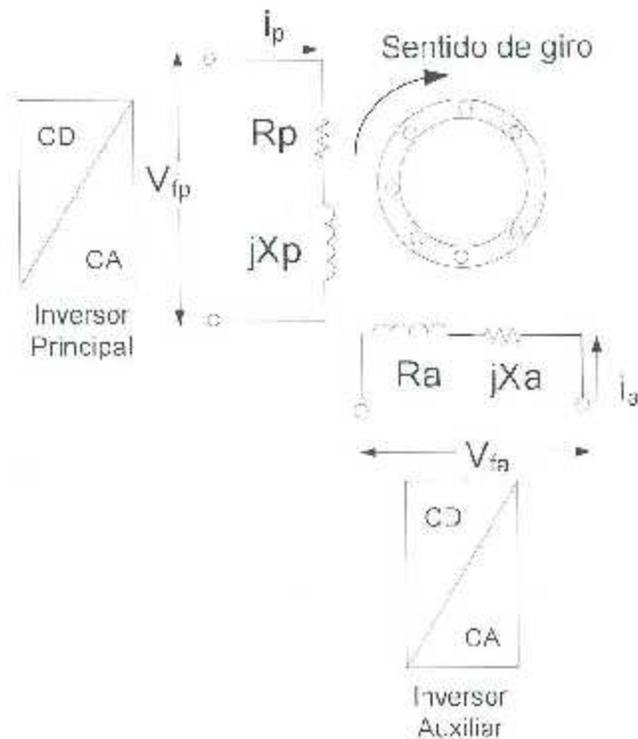


Figura 7.7. Diagrama eléctrico del motor bifásico asimétrico alimentado por dos inversores monofásicos, con el inversor auxiliar alimentando corriente a $+90^\circ$.

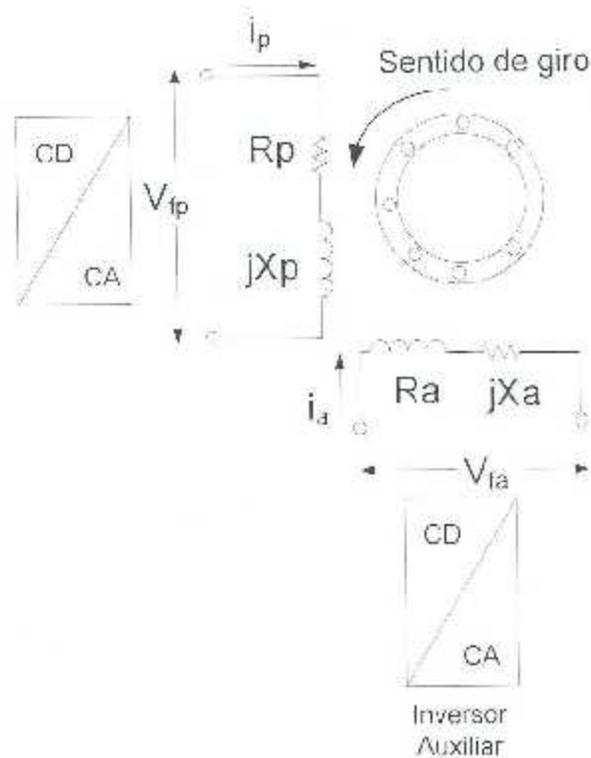


Figura 7.8. Diagrama eléctrico del motor bifásico asimétrico alimentado por dos inversores monofásicos, con el inversor auxiliar alimentando corriente a -90° .

7.2.3 Pruebas operativas al motor de inducción

Se realizaron varias pruebas al motor de inducción para verificar su funcionamiento con capacitor y una fuente de tensión de frecuencia y amplitud variable. Las pruebas permitieron revisar los niveles de tensión que recibe tanto la bobina principal como la bobina auxiliar cuando se le aplican diferentes niveles de tensión y frecuencia de alimentación. Esto permitió caracterizar el motor de inducción monofásico.

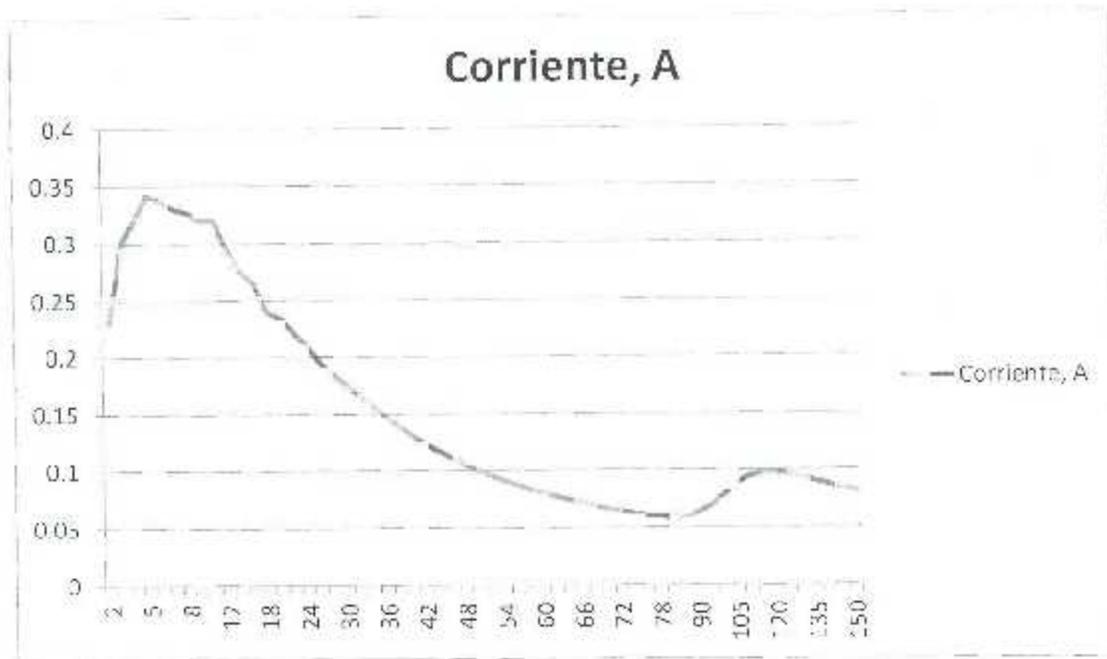


Figura 7.9. Comportamiento de la corriente de entrada al motor a diferentes frecuencias y nivel de tensión fija de 2 volts.

Por otra parte se hicieron barridos de frecuencia en el motor monofásico para descartar fenómenos de resonancia en el circuito eléctrico del motor Figura 7.10. Se puede apreciar una coincidencia entre las figuras 7.9 y 7.10, donde a 120Hz se presentan fenómenos de resonancia, pero que se encuentran alejadas de las velocidades a la que operará el equipo de bombeo.

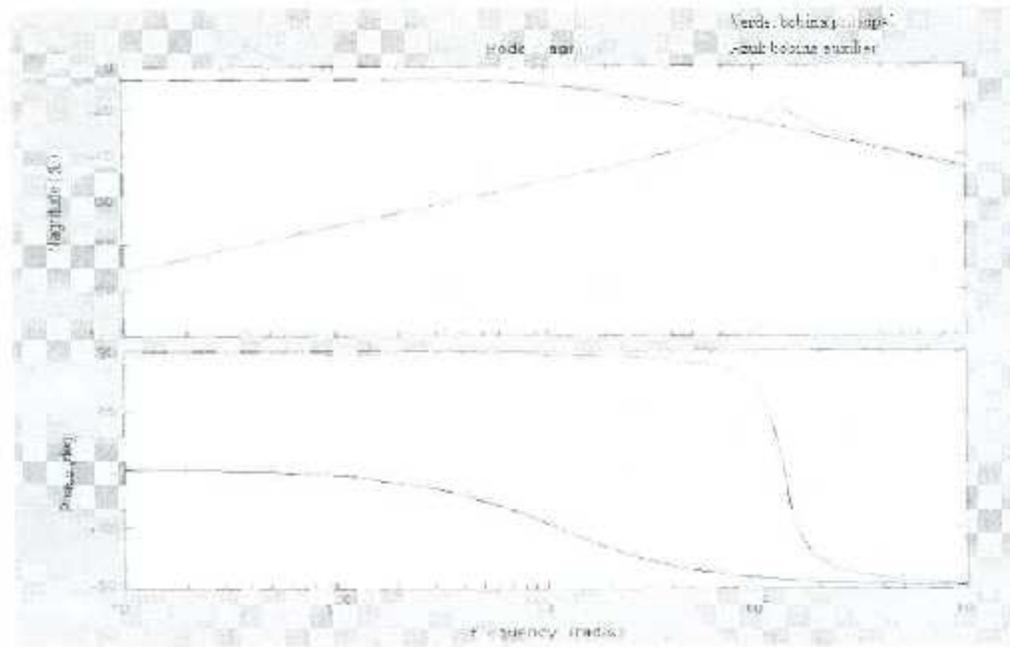


Figura 7.10 Diagrama de bode para los devanados principal y auxiliar.

7.3 Diseño de etapa de disparos del inversor

La programación de los disparos para un inversor completo se realizó mediante programación en el microcontrolador 16f877A de la familia 16 de microchip. En la figura 7.11 se puede apreciar la pantalla de simulación, así como también la utilización de un display de 16X2 caracteres para visualizar parámetros como gasto, velocidad y tensión [4].

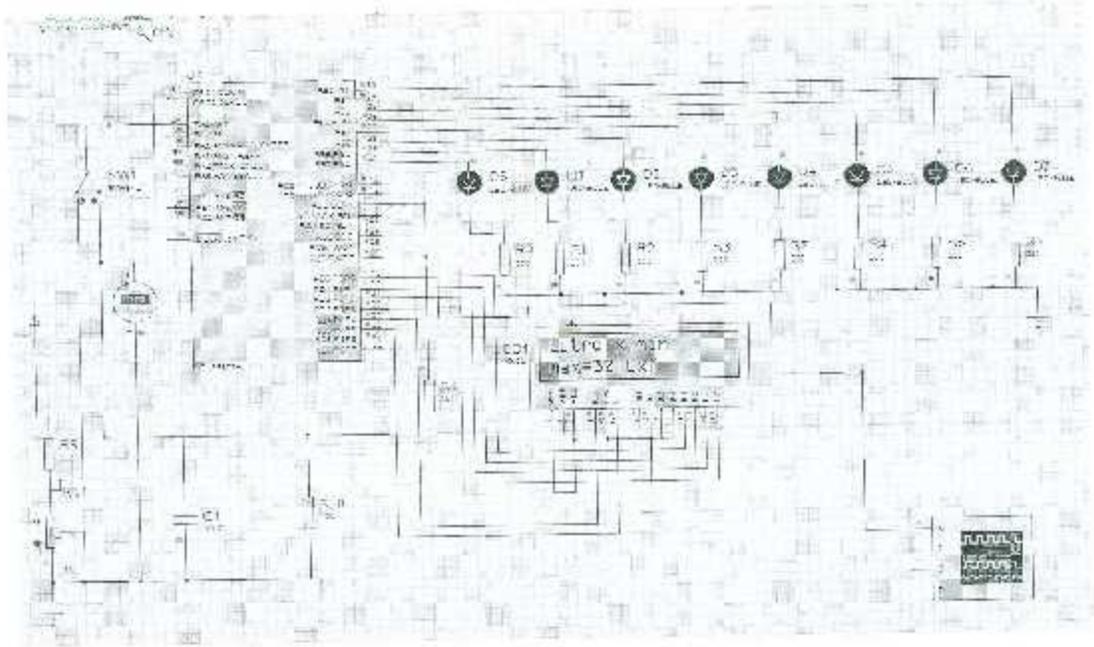


Figura 7.11 Simulación de la etapa de control de disparos en ARHS-Proteus

Para accionar los dos inversores que alimentarán las dos bobinas del motor monofásico se sincronizaron dos microcontroladores 16F877A, fig. 7.12, [5], con la finalidad de obtener un desfaseamiento en la alimentación de tensión de 90° , fig. 7.13.

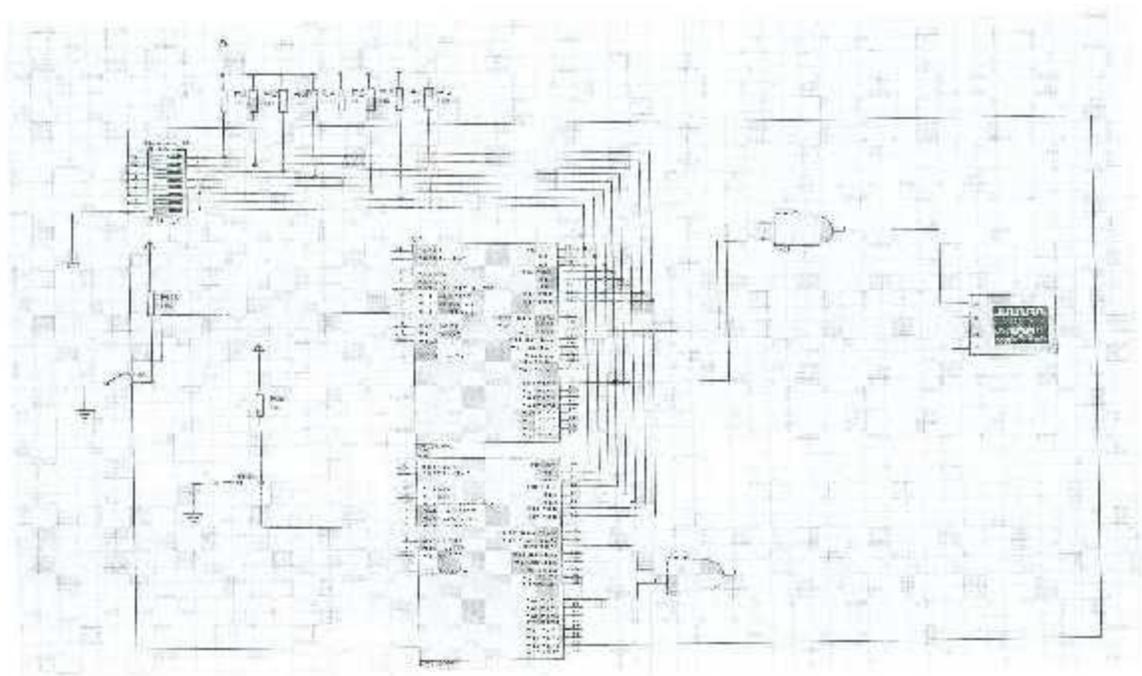


Figura 7.12 Simulación de Sincronización de microcontroladores en ARHS-Proteus.

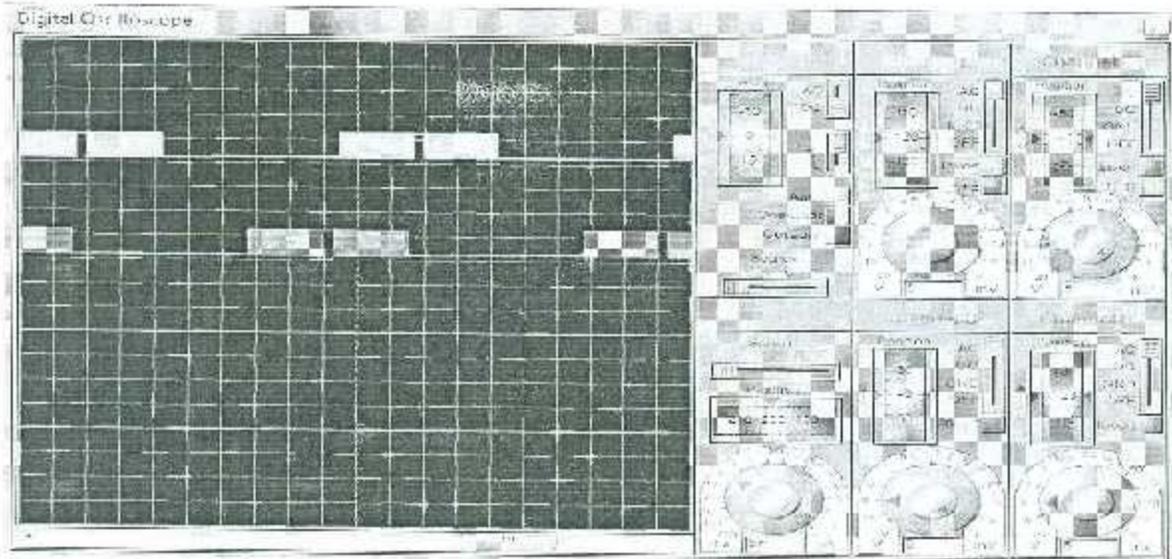


Figura 7.13 Osciloscopio de ARES-Protens. Visualización de las señales de disparo desfasadas a 90°

La implementación de la etapa de disparos para obtener un desfase de 90° entre microcontroladores se puede visualizar en las siguientes figuras. La figura 7.14a muestra un desfase de 90° que permite una alimentación desfasada a los devanados del motor y obteniendo un sentido de giro positivo. En cambio, la figura 7.14b muestra un desfase de -90° originándose una alimentación al motor que permite un sentido de giro negativo. Esta serie de pulsos se aplica a una de las ramas de cada inversor.

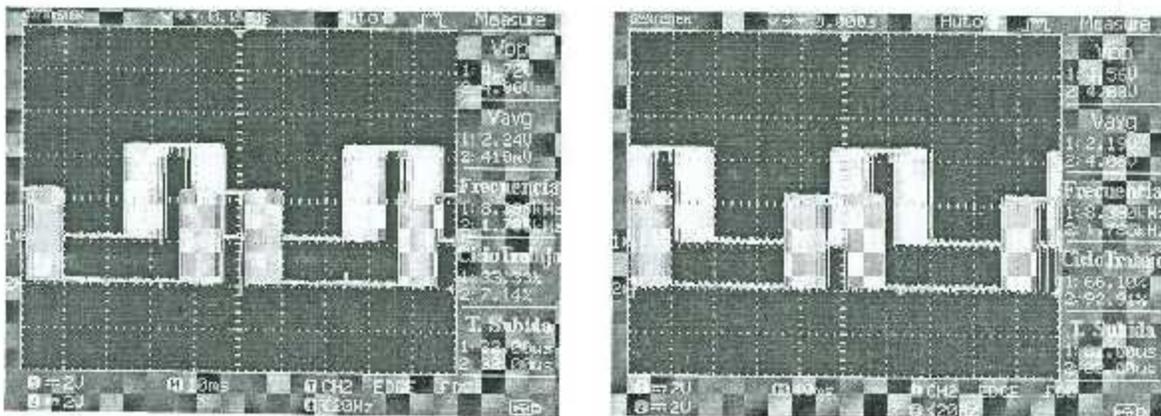


Figura 7.14 Imágenes del osciloscopio, a) Señal auxiliar (azul) con 90° de atraso. b) Señal auxiliar con retraso de 90°

7.3.1 Construcción de acoplamiento a la Etapa de Potencia

Los disparos generados por los microcontroladores deben ser aplicados a los dispositivos electrónicos de potencia, por lo que se hace necesaria una etapa para acoplar las señales de disparos (señales de baja potencia) con los elementos electrónicos que manejan señales de alta potencia. Esta etapa de acoplamiento es denominada manejador (“drive”) que permite aplicar las señales de disparo a las terminales de los dispositivos electrónicos por cada rama del inversor. En un inicio se utilizó el drive de International Rectifier IR2110 [6], pero se tuvieron complicaciones resultando en daño permanente del drive, por lo que se optó por emplear un diseño basado en dispositivos lógicos TTL desarrollado en [7] y probado en el software Proteus, fig. 7.15 Este diseño permitió trabajar con mayor seguridad los disparos hacia los inversores, por lo que el diseño se llevó al PCB con la ayuda del software ARES, figs 7.16 y 7.17.

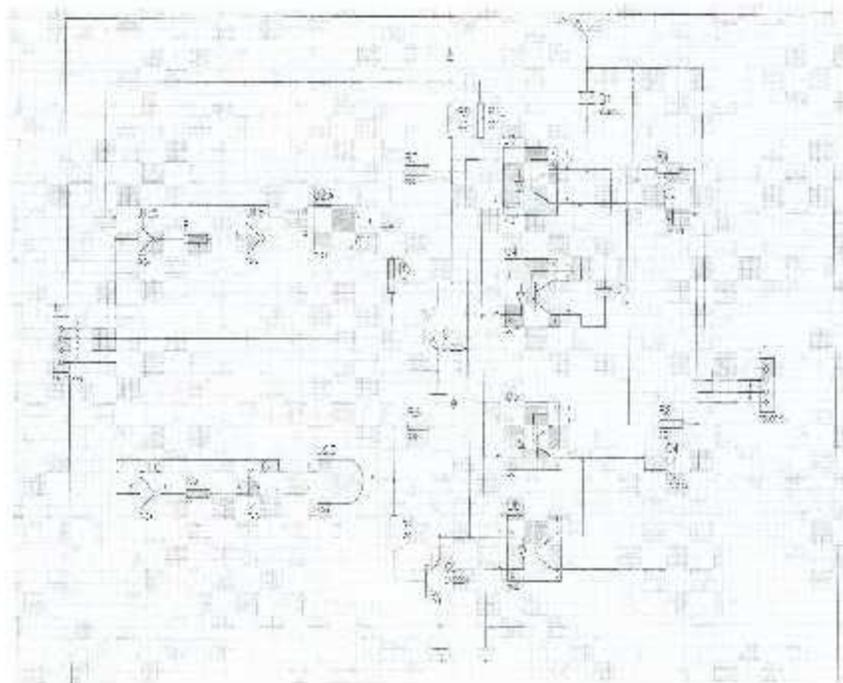


Figura 7.15 Diagrama Drive utilizado para enlazar la etapa de control con la etapa de potencia.

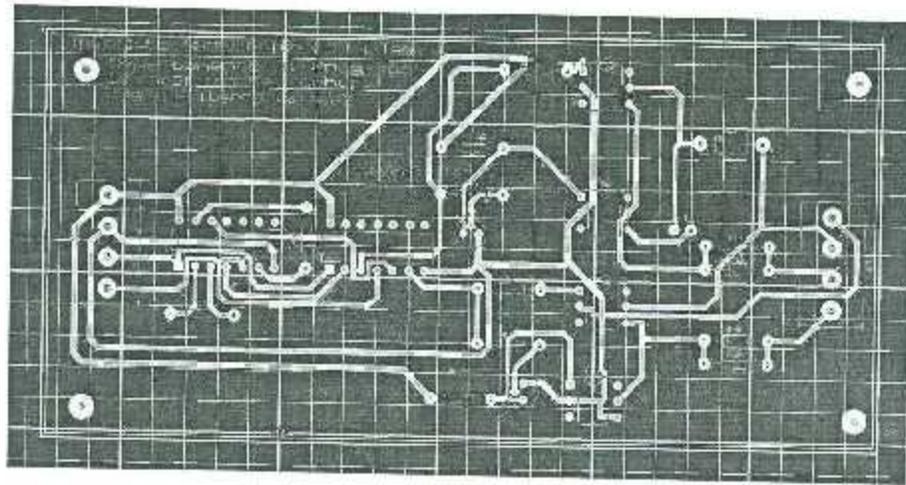


Figura 7.16 PCB del Drive utilizado para enlazar la etapa de control con la etapa de potencia.

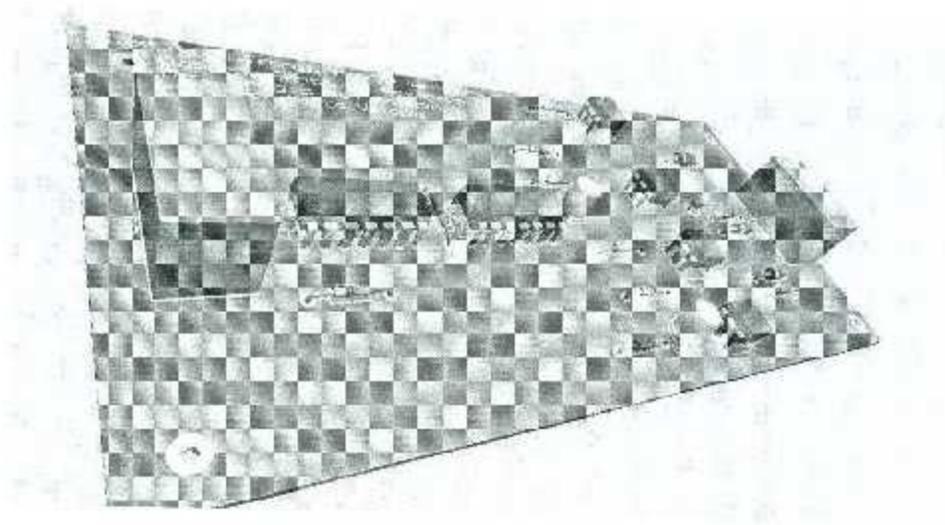


Figura 7.17 Vista 3-D del Drive utilizado para enlazar la etapa de control con la etapa de potencia

7.4 Comportamiento Práctico.

7.4.1 Alimentación a motor monofásico con capacitor.

Mediante el software LabView se llevaron a cabo el monitoreo a diferentes pruebas con diferentes características. En la figura 7.18 y 7.19 se visualiza el voltaje y la corriente nominales del motor. Está directamente conectado a una fuente de 110 v y 60 Hz. En la

figura 7.19 se puede apreciar que los devanados del motor son asimétricos. Es importante mencionar que el desbalance de voltajes se lleva a cabo mediante un capacitor. Este es el comportamiento del equipo bajo experimentación.

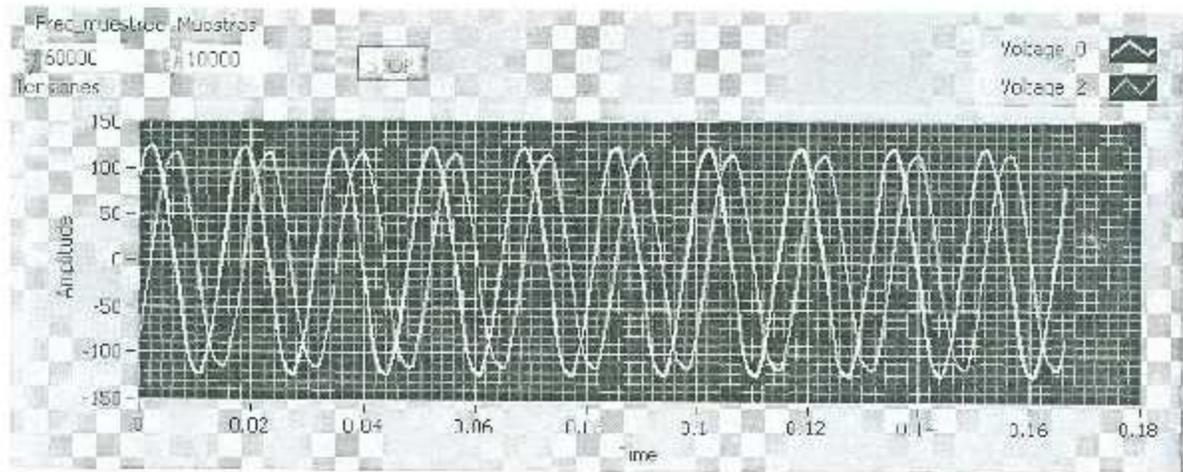


Figura 7.18 Gráfica del voltaje nominal en terminales de cada bobina del motor.

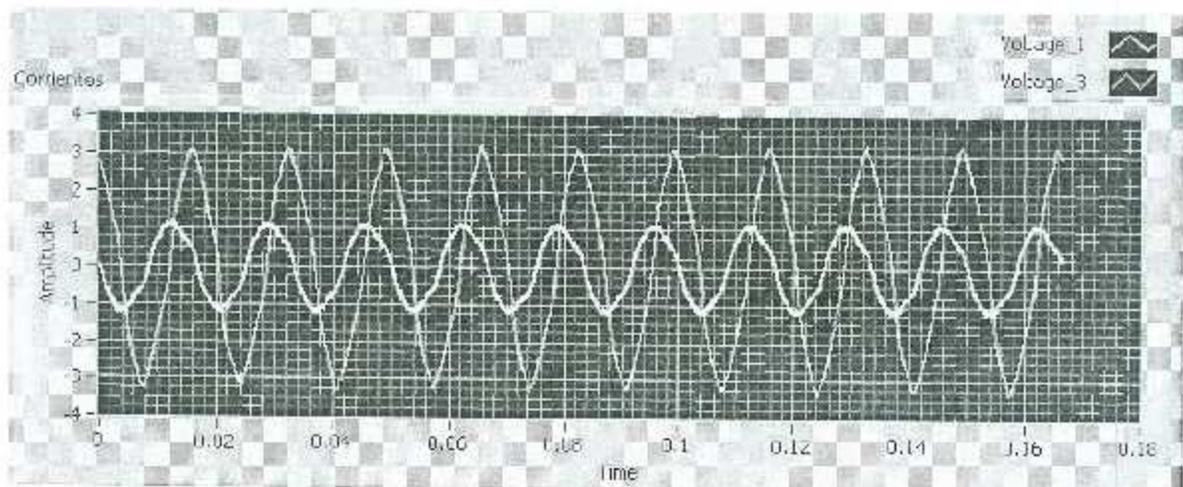


Figura 7.19 Gráfica de corriente nominal en cada bobina del motor.

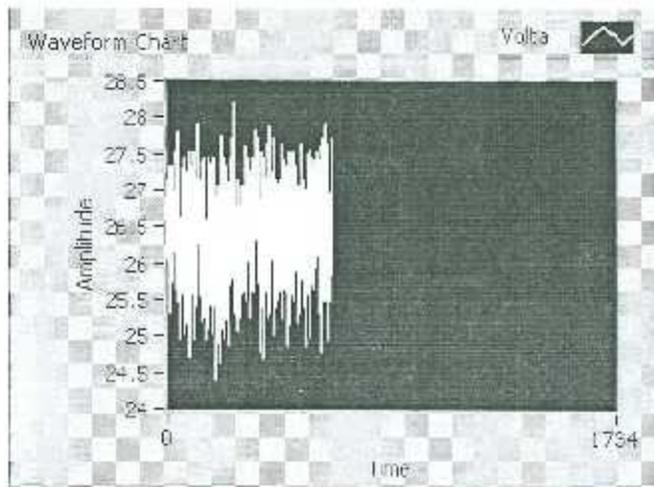


Figura 7.20 Grafica del flujo de agua por la tubería en litros por minuto

Una prueba más se realizó con frecuencia fija y voltaje variable. Como resultado se obtuvo que a un voltaje bajo no fue posible poner en marcha el motor. El devanado auxiliar que está conformado por un circuito RLC presentó una reactancia alta ante la baja frecuencia de alimentación. En las gráficas de las figuras 7.21 y 7.22 se pueden apreciar los comportamientos de los voltajes y de las corrientes.

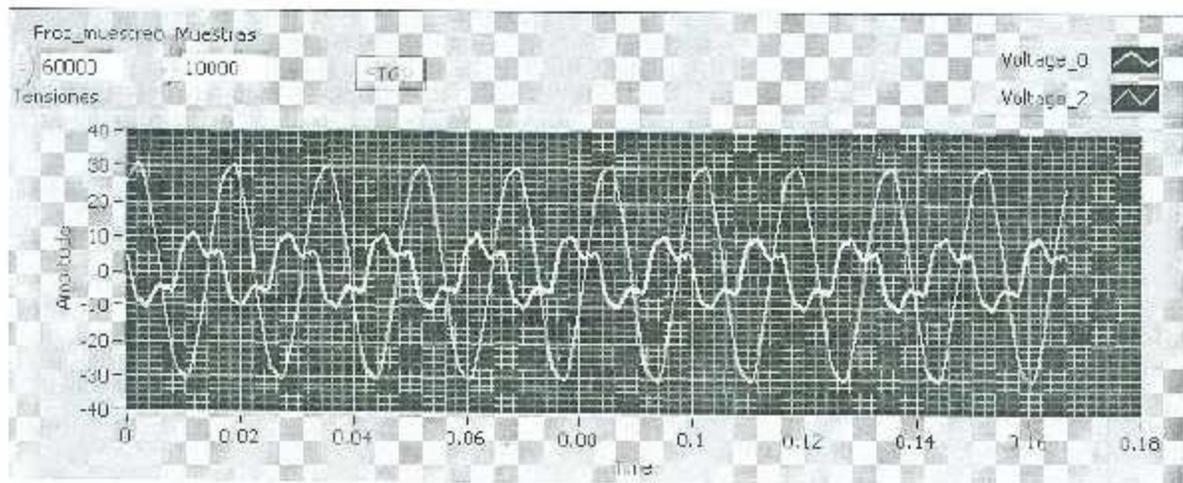


Figura 7.21 Grafica del Voltaje de 30v y 60Hz en terminales del motor.

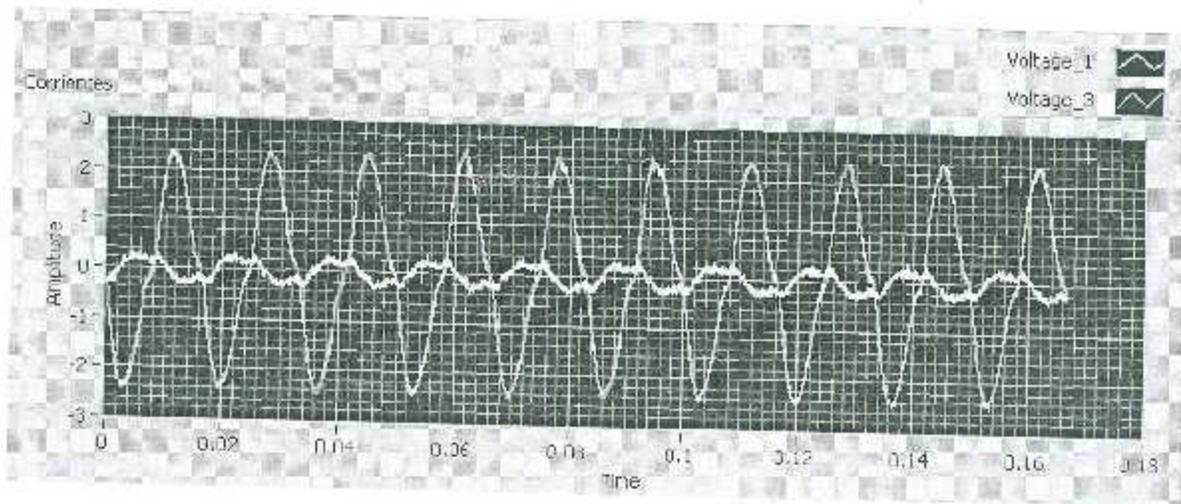


Figura 7.22 Gráfica del Comportamiento de la corriente a 30v y 60Hz en terminales del motor.

Cuando se le conectó un inversor de voltaje SPWM con una frecuencia de switcheo de 16 KHz el motor no se puso en marcha. Este resultado se dio por el comportamiento del capacitor ante las altas frecuencias. En la figura 7.23 se aprecia los voltajes en los dos devanados. El voltaje en el devanado auxiliar no se puede apreciar la senoide. El comportamiento de la corriente se ve en la gráfica de la figura 7.24.

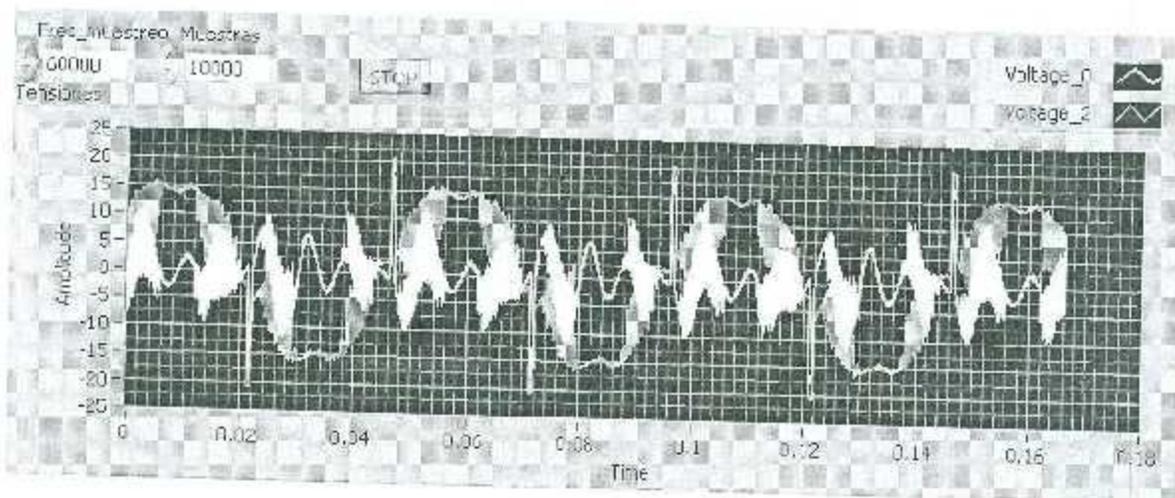


Figura 7.23 Gráfica del Comportamiento de los voltajes ante un inversor monofásico SPWM con una frecuencia de conmutación de 16 KHz.

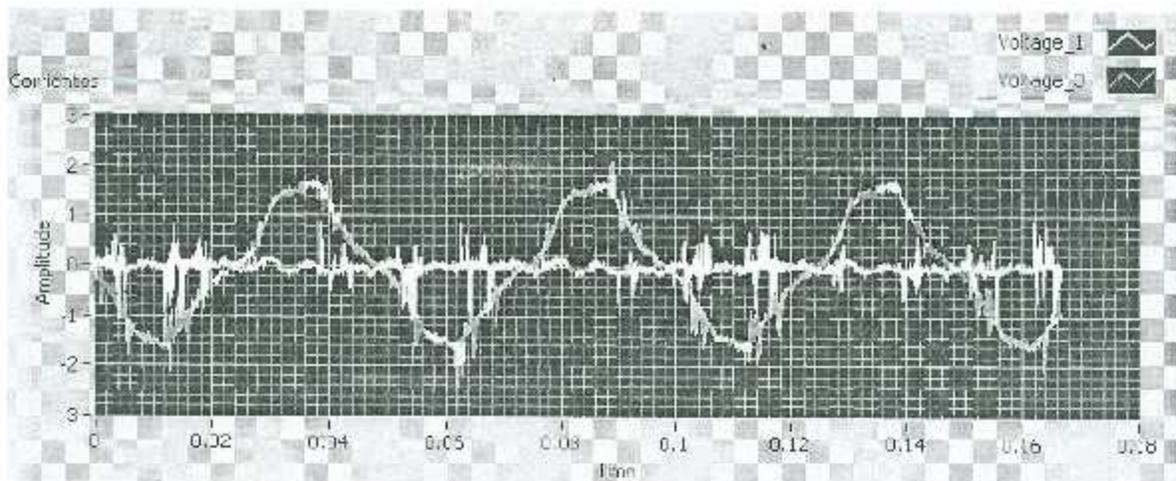


Figura 7.24 Gráfica del Comportamiento de las corrientes ante un inversor monofásico con SPWM con una frecuencia de conmutación de 16 KHz.

7.4.2 Alimentación a motor monofásico con dos inversores monofásicos

Cuando se le conectaron los dos inversores monofásicos de 90° se retiró de funcionamiento el capacitor y se realizó el desfase desde un microcontrolador, los resultados se pueden apreciar en las siguientes figuras 7.25, 7.26, y 7.27.

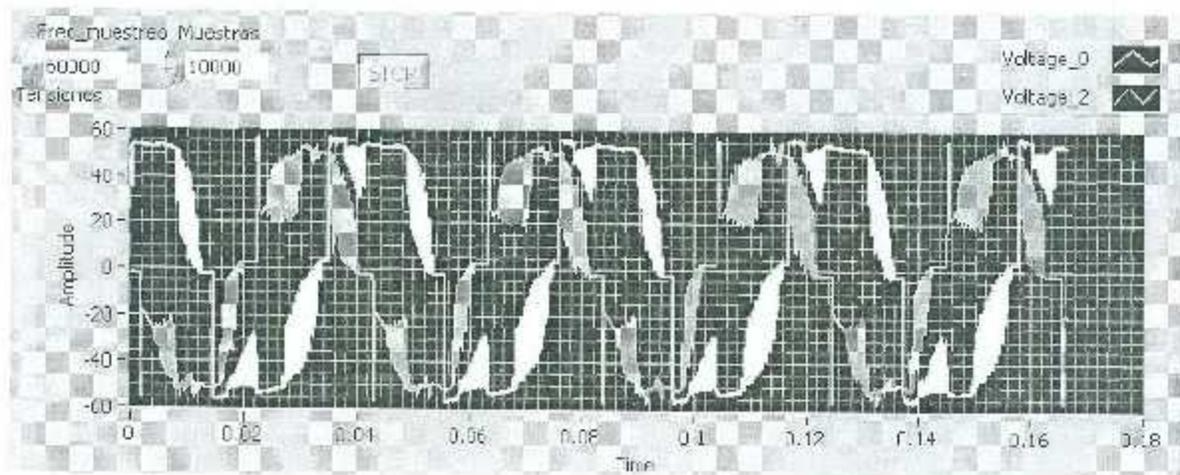


Figura 7.25 Gráfica del Comportamiento de los voltajes ante un inversor bifásico SPWM con una frecuencia de conmutación de 16 KHz la frecuencia de referencia es 20 Hz.

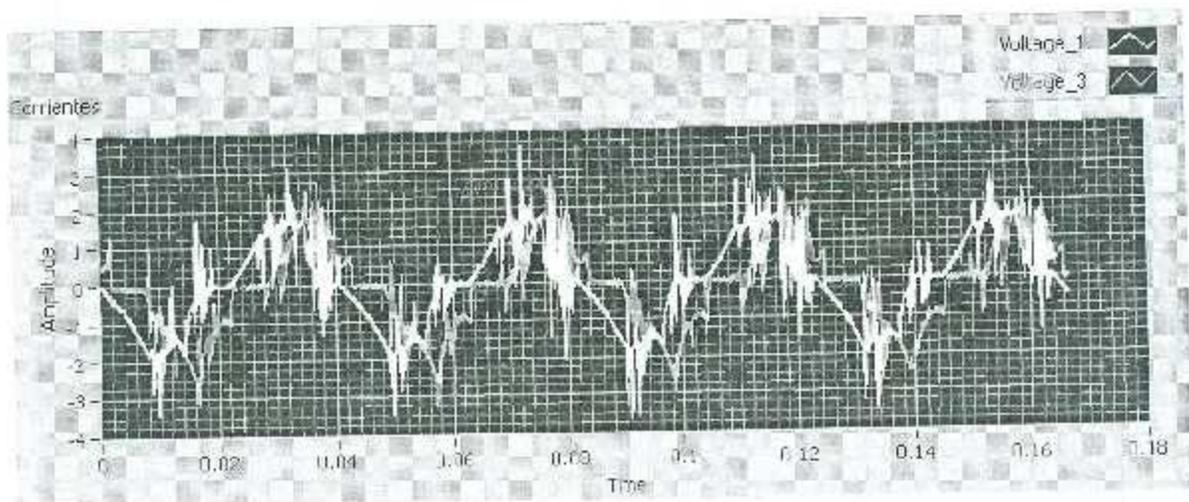


Figura 7.26 Gráfica del Comportamiento de las corrientes ante dos inversores monofásicos SPWM con una frecuencia de conmutación de 16 KHz la frecuencia de referencia es 20 Hz.

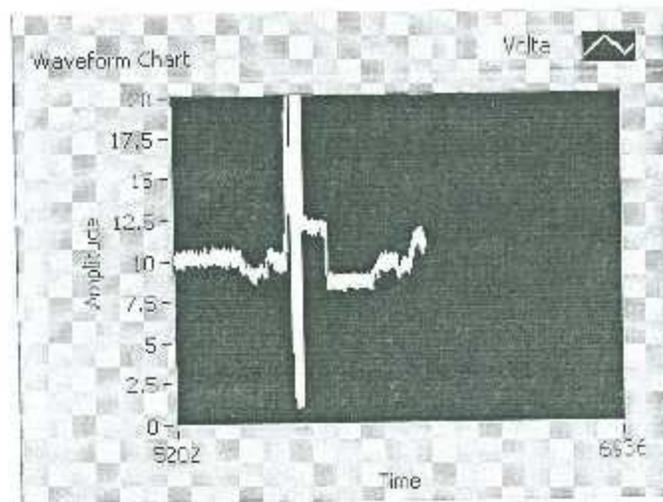


Figura 7.27 Gráfica del Comportamiento del caudal de agua en la tubería.

La implementación del equipo de bombeo se llevó a cabo, presentándose varios problemas, por lo que la etapa de experimentación en lazo abierto fue satisfactoria. El desarrollo del control de lazo cerrado presentó dificultades en la etapa del convertidor CD-CD, lo cual se requirió más tiempo para su análisis pero sin obtener resultados adecuados.

Capítulo 8

Conclusiones y Recomendaciones.

8.1 Conclusiones.

En este trabajo de tesis se realizó el análisis para el dimensionamiento de un sistema de generación fotovoltaico con almacenamiento de energía eléctrica empleado en el riego tecnificado de pequeños invernaderos. Esta aplicación es considerada de baja potencia por lo que uno de los objetivos fue analizar el dimensionamiento adecuado del arreglo fotovoltaico y del banco de baterías. Además se optó por emplear el motor monofásico con arranque por capacitor en una versión modificada para acceder a los devanados principal y auxiliar con la finalidad de utilizar dos inversores monofásicos con desfase de 90° entre sí. Esta propuesta se llevó a la experimentación donde los resultados esperados fueron satisfactorios, encontrándose algunas dificultades para integrar la totalidad del sistema en forma experimental.

La propuesta de utilizar un motor monofásico modificado para alimentar por medio de dos inversores en forma ortogonal resultó satisfactorio y aparentemente novedoso, ya que se buscó información de aplicaciones de variación de velocidad con motor monofásico y no se encontró algo similar. Se realizó un análisis del desfase de tensión en ambas bobinas del motor monofásico alimentado por capacitor, encontrándose desfases menores a 90° . Basado en este resultado se planteó la alimentación por dos inversores monofásicos ortogonales, encontrando que con desfase de $+90^\circ$ se tiene un sentido de giro y con desfase de -90° se tiene un sentido de giro contrario. Asimismo se encontró que con desfases

menores al valor absoluto de $\neq 90^\circ$ se pudo obtener reducción de velocidad y modificación en el par del motor:

Después de conocer las características de las baterías la recomendación que se hace es el evitar lo mayor posible el uso de ellas ya que tienen un tiempo de vida útil muy corto y son un factor contaminante por las sustancias químicas que contiene, hoy en día es difícil encontrar otro medio de almacenamiento con ese rendimiento para trabajar en horas donde no se cuente con la luz del sol, solo en esos casos considero aceptable su uso

8.2 Trabajos Futuros.

Después de terminar con este trabajo, quedan aún preguntas en el aire y posibles trabajos futuros. Los que se plantean son los siguientes:

- Hacer un estudio de los costos económicos, y costo-beneficio al realizar una comparación con motor trifásico y bifásico simétrico de muy baja potencia.
- Construir el prototipo experimental y ponerlo en marcha buscando obtener resultados a corto y largo plazo.

Referencias

- [1] Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE) Energía Solar: Estado actual en México 2011.
- [2] Irving M. Gottlieb. Electric Motors And Control Techniques. Mc Graw-Hill Second Edition ISBN 978-0070240124 New York.
- [3] Thompson, Marry A. Reverse-Osmosis Desalination of Seawater Powered by Photovoltaics Without Batteries Doctoral Thesis, Loughborough University, 2003.
- [4] Akihiro Oi "Design and Simulation Of Photovoltaic Water Pumping System" California Polytechnic State University, San Luis Obispo, September 2005.
- [5] Cason, Timothy N y Uhlman, Robert T. (1991) Agricultural production's impact on water an enrgy demand. Resources and Energy Economics.
- [6] Aidarov, I.P., Golyanov, A.I., Mamaev, M.g (1986). El riego Editorial Mir, Moscú.
- [7] Carillo Mario M. (2001). Las características de la actividad económica agropecuaria. El Sector Agropecuario Mexicano Antecedentes recientes y perspectivas. Editorial. Instituto Politecnico Nacional, Mexico.
- [8] Kyocera Solar Inc. Solar Water Pump Applications Guide 2001
- [9] Muhammad H. Rashid.(2004) *Electronica de potencia*. 3a Ed Pearson Prentice Hall pp.248-257.
- [10] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins. Electrónica de Potencia, Convertidores, aplicaciones y diseño. 3ª Edición, Mc Graw Hill.
- [11] Bimal, K Bose Modern Power Electronics And AC Drives 2002.
- [12] M. Arrouf, Pr. C. Goedel. "Photovoltaic pumping system for induction machine with hysteresis array current control" Reims France.
- [13] Abhisek Maiti, sumana Choudhri, Jitendranath Bera, Tista Banarjee, Shaunik Maitra. "Development of Microcontroller based Single Phase SPWM Inverter with Remote Control Facility".
- [14] B. Ismail, S. Taib MIEEE, A. R. Mohd Saad, M. Isa, C.M. Hadzer "Development of a Single Phase SPWM Microcontroller-Based Inverter" November 2006, Putrajaya, Malaysia.
- [15] Deng Jian-guo, Luo Long-fa, Luo De-rong "Simulation for SVPWM inverter-Smith single-phase motor speed control". Hunan University Chansha, China.
- [16] Mao Meiqin, Su Jianhui, Liuchen Cheng, Zhang Guorong, Lai Jidong. "Research on the performance of induction-motor-based residential Photovoltaic water pump System "
- [17] Paul C. Krause, Oleg Wasynczuk, Scott D. Sudhoff.(2002) *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*. "2a ed USA Wiley".
- [18] Stephen J Chapman. (2000) *Maquinas Electricas*, 3a Ed Mexico McGraw-Hill pp. 653-703
- [19] D.C White and H. H. Woodson, Electromechanical Energy Conversion, John Wiley and Sons, New York, 1959.
- [20] Venganzones, Blazquez, Carlos, Francisco "Transformadores y máquinas eléctricas asíncronas. Madrid 2004. ETSII-UPM
- [21] Kosow Irving L. Maquinas electricas, transformadores y controles. Editorial Prentice Hall
- [22] Kosow Irving L. Control de Maquinas Electricas. Editorial Reverte

- [23] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr, Stephen D. Umans (2004) *Maquinas Electricas*, 6a Ed Mexico McGraw-Hill pp. 451-545.
- [24] Compañía bombas ical S.A. "Datos técnicos de Hidráulica, Bombas" Valencia, España
- [25] Dr. Federico Rivero Palacio, Mecanica de los Fluidos, Bombas Centrifugas, Instituto Universitario de Tecnologia, Departamento de Procesos Quimicos, 2008
- [26] Pedro Fernández Díez, "Bombas centrifugas y volumétricas", Universidad de Cantabria, departamento de ingeniería eléctrica y energética.
- [27] I Martín, R. Saucedo, R. Fort "Mecánica de fluidos, Impulsion de fluidos." Universidad de Alicante 2011.
- [28] P. J. Pritchard, "Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics", 8th Edition, Wiley 2011.
- [29] Ing Juan J. Garcia, MSc. Ricardo Bermudez, Msc. Jhon Barbosa. "Modeling and Simulation of a Centrifugal Pump with Single Phase Motor in Simulink" Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, Volumen 22, No 22, 2013
- [30] Hernan C. Levy "ANPA Requerida" M3h Revista de Bombas #35 Octubre/Noviembre 2009 ISSN 1669 4066 Ciudad Autonoma de Bs As Argentina.
- [31] O. Gil-Arias, E. Ortiz Rivera, "A general purpose tool for simulating the behavior of PV solar cells, panels and arrays ", Workshop on Control and modeling for power Electronics, Aug. 2008.
- [32] M. Kolhe, J.C. Joshi, D. P. Kothari, "Performance analysis of a directly couples photovoltaic water-pumping system", IEEE Transaction on Energy Conversion, Sept 2004.
- [33] M. Veerachary, T. Senjyu, K. Uezato, "Maximum power point tracking control of IBD converter supplies PV system", Applied Power Electronics Proc., Nov. 2001.
- [34] Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería. Celdas Fotovoltaicas En Generacion Distribuida. Santiago de Chile 2005
- [35] Stefan Krauter. Solar Electric Pwer Generation, Photovoltaic Energy Systems Springer 2006 ISBN 3 540 31345 1.
- [36] J.L. James Lammie, editor. Electric Vehicle Technology Explained. John Wiley & Sons, Ltd, 2003.
- [37] ECEN 2060 "PV Module Simulink Models", 2008.
- [38] Vision Rechargeable Products Sealed Lead Acid Battery 6FM100-X 12v 100Ah. Data-Sheet.
- [39] Ma Caridad Perez de los Reyes "Aplicaciones de la energia solar al tratamiento térmico de suelos de invernadero" Ingeniería Grafica e Ingeniería y Sistemas de Información Cartográfica, Universidad de Cordoba.
- [40] Vision Rechargeable Products Sealed Lead Acid Battery 6FM100-X 12v 100Ah. Data-Sheet.