

GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD A PARTIR DE ELECTROBOMBAS PARA ZONAS AISLADAS

Fabián Alberto Ríos Orozco
Jairo Camilo González Carrascal

11 de Diciembre de 2014

Trabajo de Grado

T.G. 1444

Directores:

Ing. Alberto David Ávila Urueña

Ing. Rafael Fernando Díez Medina

Pontificia Universidad Javeriana
Ingeniería Electrónica

Queremos otorgar los más grandes agradecimientos a las personas que aportaron parte de su tiempo y trabajo para el desarrollo de esta tesis, en especial a nuestros directores, por su atención incondicional y su colaboración. También queremos dejar el reconocimiento a los laboratorios de electrónica e hidráulica de la facultad de ingeniería de la Universidad por el préstamo del espacio y de los equipos necesarios.

A nuestras familias por su apoyo en el tiempo de trabajo de la tesis y a Dios que hizo posible el alcance de este logro.

CONTENIDO

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	4
INTRODUCCIÓN:.....	6
1. MARCO TEÓRICO.....	8
1.1 MOTOR DE INDUCCIÓN MONOFASICO DE TIPO “ARRANQUE Y OPERACIÓN NOMINAL POR CONDENSADOR” (CAPACITOR-RUN MOTOR):.....	8
1.2 REGIONES DE OPERACIÓN DE UNA BOMBA CENTRIFUGA:.....	8
1.3 TRANSICIÓN MOTOR-GENERADOR:.....	9
1.4 ANTECEDENTES:.....	9
2. ESPECIFICACIONES	10
2.1 CONVERTIDOR BIDIRECCIONAL:.....	11
2.2 SOFTWARE:.....	12
2.3 SISTEMA DE PRUEBAS HIDRÁULICO:.....	12
3. DESARROLLOS	15
3.1 CARACTERIZACIÓN ELECTRICA DEL MOTOR DE LA ELECTROBOMBA PKm 60:...	15
3.2 MODELO DE LA BOMBA CENTRÍFUGA DE TIPO PERIFÉRICA DE LA ELECTROBOMBA PKm 60:	15
3.3 DISEÑO DEL CONVERTIDOR BIDIRECCIONAL:	16
4. ANALISIS DE RESULTADOS	29
4.1 RESULTADOS DEL CONVERTIDOR EN MODO INVERSOR:.....	29
4.2 RESULTADOS DE LA ELECTROBOMBA EN MODO GENERADOR:	37
5. CONCLUSIONES	53
BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN.....	56

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Torque vs Velocidad en Maquinas de Inducción.....	7
Ilustración 2 Motor de inducción monofásico de tipo “arranque y operación nominal por condensador” (capacitor-run motor)	8
Ilustración 3 Modos de Operación de una electrobomba centrifuga.....	9
Ilustración 4 Diagrama de Bloques	10
Ilustración 5 Foto Del Convertidor Con Soporte	11
Ilustración 6 Conexión Electrobomba.....	13
Ilustración 7 Montaje Eléctrico	13
Ilustración 8 Conexiones Eléctricas de la Electrobomba	14
Ilustración 9a Montaje Hidráulico: Conexión Directa	14
Ilustración 10 Modelo Eléctrico del Motor de la Electrobomba Pkm 60	15
Ilustración 11 Relación Presión vs Caudal de la electrobomba.....	16
Ilustración 12 Modulación Implementada.....	18
Ilustración 13 Circuito Esquemático del Convertidor.....	19
Ilustración 14 Simulación del Voltaje de Salida de la Fuente Boost y Corriente que Entrega la Batería con Respecto al Tiempo.....	19
Ilustración 15 Acercamiento Simulación del Voltaje de Salida de la Fuente Boost y Corriente que Entrega la Batería	20
Ilustración 16 Simulación del Voltaje y Corriente de Salida del Inversor con Respecto al Tiempo	20
Ilustración 17 Simulación de la Corriente de Salida del Inversor con Respecto al Tiempo.....	20
Ilustración 18 FFT del Voltaje de Salida del Inversor	21
Ilustración 19 Circuito Esquemático Boost y Puente H	27
Ilustración 20 Circuito de Señales de Control de la Boost.....	28
Ilustración 21 Voltaje de Salida del Convertidor.....	30
Ilustración 22 FFT del Voltaje de salida del Convertidor en Ventana de 600 Hz	30
Ilustración 23 FFT del Voltaje de salida del Convertidor en Ventana de 90 kHz	31
Ilustración 24 Corriente de salida y FFT de la corriente de salida (centro 60 Hz y una ventana de 1 kHz).	31
Ilustración 25 Voltaje de Entrada	32
Ilustración 26 Corriente de Entrada del Convertidor, con Tiempo por División de 5ms.....	33
Ilustración 27 Corriente de Entrada del Convertidor, con Tiempo por División de 14ms	33
Ilustración 28 Verde: Corriente de la Inductancia de la Boost. Azul: Voltaje de la Inductancia de la Boost.	34
Ilustración 29 Amarillo: Voltaje Gate-Source del Mosfet de abajo de la Boost.....	35
Ilustración 30 Voltaje de salida de la Boost	36
Ilustración 31 Modulación De Puente H. Vgs De Cada Uno De Los Mosfets De Una Rama.....	36
Ilustración 32 Modulación De Puente H De Cada Una De Las Ramas	37
Ilustración 33 Caracterización Modo Directo sin Energizar: Caudal (L/s) vs Frecuencia Mecánica (Hz) .	37
Ilustración 34 Caracterización Modo Directo sin Energizar: Presión (PSI) vs Frecuencia Mecánica (Hz)	38
Ilustración 35 Caracterización Modo Inverso sin Energizar: Caudal (L/s) vs Frecuencia Mecánica (Hz) .	38
Ilustración 36 Caracterización Modo Inverso sin Energizar: Presión (PSI) vs Frecuencia Mecánica (Hz)	39
Ilustración 37 Porcentaje de Eficiencia Eléctrica de la Electrobomba vs Ro	40
Ilustración 38 Porcentaje de Eficiencia Eléctrica de la Electrobomba vs Co	41
Ilustración 39 Potencia de Salida del Sistema vs Co	41
Ilustración 40 Potencia de Salida del inversor vs Frecuencia Mecánica (Hz).....	43

Ilustración 41 Potencia de Salida vs Potencia del Inversor	43
Ilustración 42 Potencia de Salida vs R_o	44
Ilustración 43 Potencia Hidráulica vs R_o	44
Ilustración 44 Desfase entre Corriente y Voltaje de salida	45
Ilustración 45 Potencia de Salida vs Potencia del Inversor	45
Ilustración 46 Potencia Hidráulica vs R_o	46
Ilustración 47 Potencia de Salida vs R_o	46
Ilustración 48 Velocidad después del encendido del inversor vs Velocidad antes del encendido del inversor.....	47
Ilustración 49 Velocidad Mecánica Final (RPM) VS Porcentaje Eficiencia Eléctrica Electrobomba	47
Ilustración 50 Porcentaje Eficiencia Electrobomba vs Velocidad Mecánica Inicial (RPM)	48
Ilustración 51 Porcentaje Eficiencia Eléctrica De La Electrobomba vs VRMS de Salida del Inversor.....	49
Ilustración 52 Comparación de Potencias En el Caso de Mayor Eficiencia.....	49
Ilustración 53 Grafica de Torque vs Velocidad en Maquinas de Inducción Mostrando el Punto Alcanzado.	50
Ilustración 54 Comparación entre la Frecuencia Mecánica del Motor y la eléctrica del Inversor.....	50
Ilustración 55 Comparación de Potencias	51
Ilustración 56 Presión (PSI) vs Caudal (l/s)	52

INTRODUCCIÓN:

En la actualidad, en Colombia existen cerca de 1'400.000 personas que habitan en Zonas No Interconectadas -ZNI, que equivalen a una extensión aproximada del 52 % del territorio nacional(Ver Anexo 1). Lo anterior se debe principalmente a que estos lugares son de difícil acceso o no tienen la suficiente demanda eléctrica para sustentar la inversión de la extensión de la red [1]. Por eso la población y los gobiernos locales, han buscado otras posibilidades de acceso a la energía eléctrica. Entre ellas se han usado micro-generadores hidráulicos, pero su implementación resulta costosa debido a que el mercado en Colombia de este tipo de máquinas es muy escaso (Ver Anexo 2).

Una alternativa para adquirir energía eléctrica, es usando una máquina común en el mercado colombiano[2], como es la electrobomba con motor de inducción monofásico, teniendo en cuenta el potencial hídrico tan alto en el país.Ésta podría llegar a ser una solución muy conveniente para las ZNI que cuenten con una fuente de agua cercana.El presente trabajo de gradoexplora la posibilidad de transformar esta electrobomba, que está diseñada para bombear fluidos, en un generador eléctrico.

Es necesario mencionar que en el mercado actual es posible encontrar diversos sistemas que pueden emplearse para transformar la energía hidráulica en energía eléctrica, sin embargo la idea de operar las electrobombas como generadores se debe a que estas son un producto de fácil acceso en el mercado, de fabricación local (tema que facilita cuestiones de mantenimiento de la máquina y garantía) y de fácil instalación. Además son económicas en relación a los generadores hidráulicos que se encuentran en venta en el país y a otras máquinas que se pueden usar para la misma aplicación, como lo son las turbinas hidráulicas tales como la turbina Pelton (la más conocida en el mercado del país) que tiene un precio en el país alrededor de 500.000 pesos [3], generadores síncronos, bombas hidráulicas de eje libre o finalmente la posibilidad de un alternador (300.000 pesos)[4]. Todo lo dicho en el contexto de generación eléctrica para zonas no interconectadas y para demandas de potencias alrededor de 250W.A continuación una tabla que compara los costos promedios de algunas de las maquinas mencionadas:

Maquina	Incluye	Ubicación	Costo (Pesos colombianos)
Bomba hidráulica eje libre	Turbina	Colombia (Distribuidor Barnes)	590.000
Alternador de automóvil	Generador	Colombia	300.000
Turbina-Generador 300 W	Turbina y Generador	Distribuidor en Medellín de Fabricante Chino.	4.809.283 (Cotización en Anexo 2)
Electrobomba Periférica ½ HP Pkm 60 (Pedrollo)	Turbina y Motor	Distribuidores en Bogotá de fabricante Italiano.	188.500 (Cotización en Anexo 3)

Tabla 1 Comparación de Costos de Maquinas alternativas

Las electrobombas centrifugas son máquinas de alta eficiencia[5], fabricadas y usadas para bombeo de agua, en Colombia se encuentra desde medio caballo de potencia en adelante. Usualmente estas electrobombas cuentan con una bomba periférica, la cual es un tipo de bomba centrifuga, que está unida a un motor de inducción, responsable de impulsar las aspas de la bomba y mover el agua (cuando opera como bomba).

Decidimos trabajar con la electrobomba PedrolloPkm60 debido al reconocimiento de la marca, a la posibilidad de operarla con las condiciones hidráulicas ofrecidas por el laboratorio hidráulico de la Universidad Javeriana y por su bajo costo.

De igual forma debemos recordar que las electrobombas operan usualmente conectadas a la red, mientras que en nuestro caso buscaremos utilizarla como generador en una ZNI. Para lograr lo anterior, es necesario construir un convertidor bidireccional DC-AC que cuente con un sistema de almacenamiento recargable con el fin de dar arranque a la electrobomba (emulando la línea), para luego alcanzar el modo

de operación como generador al superar la velocidad de sincronismo (Ver ilustración 1), la idea es llegar al punto de velocidad donde se ejerce más torque en operación como generador y evaluar la energía que nos puede entregar la máquina.

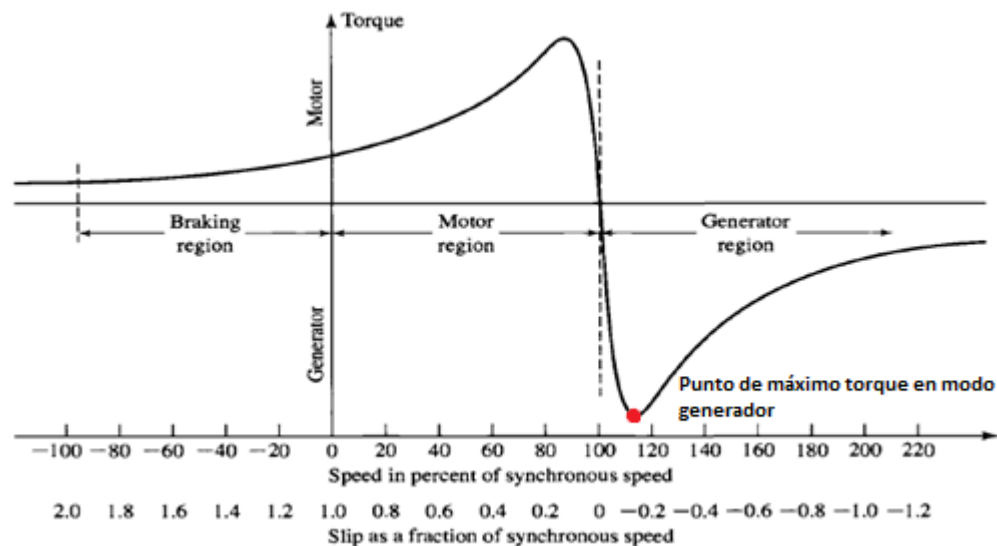


Ilustración 1 Torque vs Velocidad en Maquinas de Inducción.¹

El objetivo general del proyecto es evaluar el uso de una electrobomba hidráulica de motor de inducción, operando como generador de energía eléctrica, para trabajar en zonas no interconectadas a la red, implementando un convertidor bidireccional. Para lograr esto se definieron los siguientes objetivos específicos:

- Identificar el comportamiento de la relación presión vs caudal en la entrada hidráulica del sistema, para encontrar el máximo punto de potencia de la electrobomba Pkm 60 marca Pedrollo en modo generador.
- Diseñar un convertidor bidireccional que como inversor sea capaz de suministrar la energía necesaria para el arranque de una electrobomba Pkm 60 marca Pedrollo. El convertidor en éste modo tendrá una señal de salida de $110\text{ V} \pm 30\text{ V}$, una frecuencia fundamental de $60\text{ Hz} \pm 10\text{ Hz}$ y una potencia de salida de 370 W.
- El convertidor del ítem anterior cuando opere como rectificador debe permitir la carga de cuatro baterías en serie de 12 voltios de forma óptima. El convertidor en éste modo tendrá una eficiencia mínima de 75% en el punto de máxima potencia de la bomba en modo generador.
- Construir un sistema de prueba con el fin de suministrar la energía hidráulica necesaria para el funcionamiento de la electrobomba Pkm 60 marca Pedrollo, utilizando los elementos disponibles en el laboratorio de hidráulica de la facultad de ingeniería.
- Evaluar la eficiencia de conversión de energía de la electrobomba en modo generador.

¹Ilustración tomada de la referencia [6]

1. MARCO TEÓRICO

El marco teórico lo iniciaremos presentando las características de un motor de inducción monofásico de tipo “arranque y operación nominal por condensador” (capacitor-run motor), el cual es el motor con el que cuenta la electrobomba PKm60. Posterior a ello se explicará la transición de la máquina de inducción desde modo motor a modo generador, así como las regiones de operación de la bomba y finalmente se mencionarán aportes realizados en estudios anteriores y las diferencias con respecto a ellos.

1.1 MOTOR DE INDUCCIÓN MONOFÁSICO DE TIPO “ARRANQUE Y OPERACIÓN NOMINAL POR CONDENSADOR” (CAPACITOR-RUN MOTOR):

Los motores de tipo “arranque y operación nominal por condensador” [7] (capacitor-run motor) son también motores de fase dividida, es decir tienen dos devanados de estator: un devanado principal y un devanado auxiliar asociado al arranque. La diferencia del motor de la electrobomba a emplear con respecto al de fase dividida radica en que el primero cuenta con un capacitor en serie con el devanado auxiliar con el fin de lograr el desplazamiento en tiempo de fase entre las dos corrientes y así lograr el arranque del motor. De igual forma luego del arranque el capacitor y el devanado auxiliar sirven para eliminar las pérdidas asociadas al campo magnético de retroceso y así mejorar la eficiencia. La selección del capacitor debe hacerse teniendo en cuenta el compromiso entre el mejor arranque y la mejor puesta en marcha. El valor típico del capacitor para un motor de 500 W es de 40 μF , el de la electrobomba PKM60 de 370 W es de 25 μF [8].

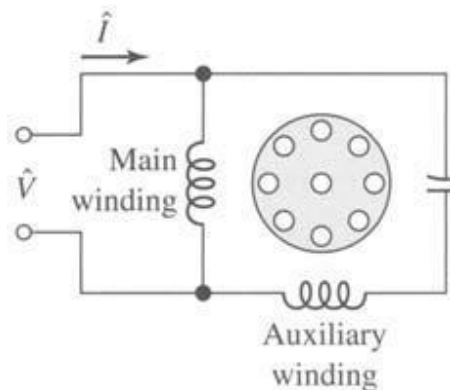


Ilustración 2 Motor de inducción monofásico de tipo “arranque y operación nominal por condensador” (capacitor-run motor)²

1.2 REGIONES DE OPERACIÓN DE UNA BOMBA CENTRIFUGA:

En la literatura [21] es posible encontrar los modos de operación de una bomba centrífuga, debemos recordar que la electrobomba PKm 60 cuenta con una bomba periférica, la cual es un tipo de bomba centrífuga, éstos modos de operación dependen del caudal (q), el torque (m), la cabeza hidráulica (h) y la velocidad (n). En nuestro caso, se puede operar la bomba en el modo “Normal Turbine” o en modo “Reverse Flow Turbine” (ver Ilustración 3).

² Imagen tomada de la referencia [7]

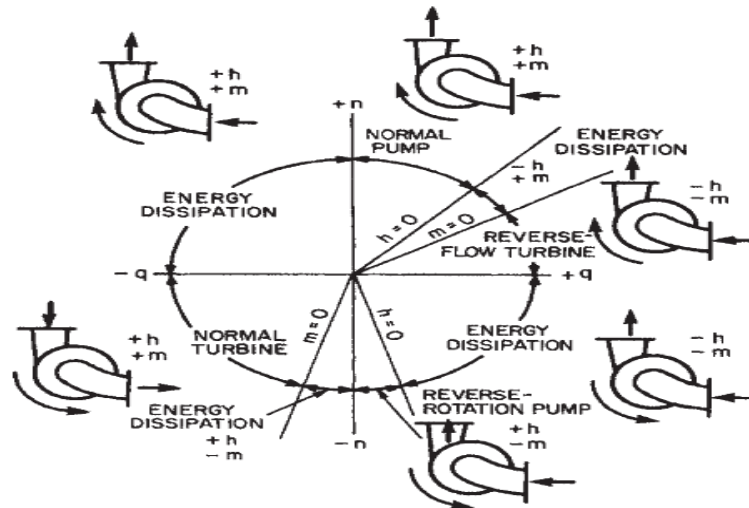


Ilustración 3 Modos de Operación de una electrobomba centrífuga³

1.3 TRANSICIÓN MOTOR-GENERADOR:

En la referencia [9] se explica que una máquina de inducción puede ser operada como generador si los terminales del estator se encuentran conectados a una fuente de voltaje y si además se supera la velocidad de sincronismo como se evidencia en la ilustración 1. Además resaltan que la fuente entrega la potencia reactiva requerida para el campo magnético.

1.4 ANTECEDENTES:

Los trabajos hallados más significativos realizados anteriormente son [10] y [11]. Debemos resaltar que la diferencia de nuestro trabajo con respecto a [10] está en que la electrobomba que pretenden operar como generador cuenta con un motor trifásico por lo tanto el sistema planteado para poder operar el motor es diferente. Por otro lado, la referencia [11] plantea una solución del problema similar a la nuestra, es decir a partir de un voltaje DC se pretende poder emular la línea por medio de un convertidor DC-AC (inversor eléctrico) con el fin de dar arranque al motor y posteriormente llevar el motor a operar como generador cuando este recibe el impulso mecánico del flujo de agua. La discrepancia con el modelo propuesto por ellos, está en que en nuestro caso el voltaje DC de entrada del inversor es la elevación del voltaje de una batería recargable a partir de un convertidor Boost bidireccional, mientras que ellos parten de tener una fuente que les suministra el Voltaje DC necesario para alimentar el inversor y este a su vez poder darle arranque al motor.

³ Ilustración tomada de la pag. 2.379 de la referencia [21]

2. ESPECIFICACIONES

Para alcanzar los objetivos planteados se hace necesario implementar un convertidor bidireccional con una señal de salida de $110\text{ V} \pm 30\text{ V}$, frecuencia fundamental de $60\text{ Hz} \pm 10\text{ Hz}$ y que entregue hasta 370 W , debe asegurar una eficiencia mayor a 75% en estas condiciones, además debe permitir cambiar por programación, las frecuencias de conmutación, frecuencia fundamental de salida, ciclo útil de la Boost, índice de modulación del puente H, tiempo de duración del arranque lento (se explicará posteriormente) y el tipo de modulación a usar, éste convertidor debe poder trabajar con distintos valores de voltaje de entrada del circuito de potencia, como valor máximo 48 V (alimentado con baterías Vision 6FM65 12V 65AH), y sobre un montaje que permita fácilmente hacer los cambios que lleguen a ser necesarios y proteger el circuito a través de fusibles. Entonces se debe desarrollar un algoritmo para implementar sobre un micro-controlador que permita manejar el convertidor. Para evaluar el comportamiento de la electrobomba como generador, se requiere construir un sistema hidráulico que posibilite: inyectar el caudal de agua, operar la electrobomba en modo directo o inverso y medir el caudal y la presión en la entrada y en la salida de la bomba.

Básicamente el proyecto se puede resumir en este diagrama de bloques:

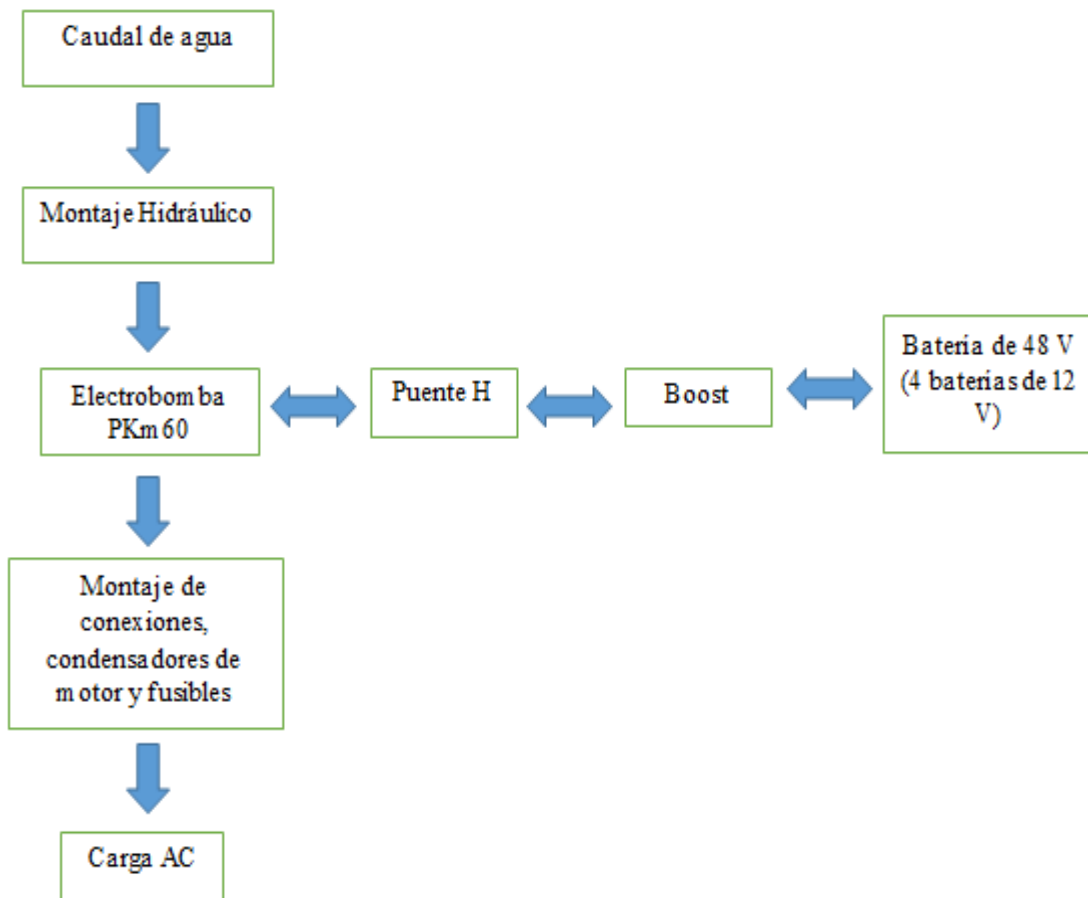


Ilustración 4 Diagrama de Bloques

2.1 CONVERTIDOR BIDIRECCIONAL:

Característica:	Especificación	Logrado
Potencia máxima:	370W	373W
Eficiencia modo inversor:	-	78%
Eficiencia modo rectificador:	75 %	-
Voltaje RMS de salida:	110 ± 30 Vrms	123 Vrms
Fuentes de alimentación:		
Voltaje de potencia:	48 V	48 V; I máx.: 10,27 A
Voltaje para drivers:	-	24 V; I máx.: 100mA
Fuente para el control:	-	12 V ; I máx.: 250 mA
Frecuencia Fundamental (seno)	60 ± 10 Hz	60 ± 2 Hz
Frecuencias de conmutación de inversor	-	30 kHz
Frecuencias de conmutación de la Boost	-	25 kHz
Temperatura en máxima potencia	-	80°C @ t _{amb} : 25 °C.
Tamaño de soporte:	-	40 cm x 45 cm (Ver ilustración 5).

Tabla 2 Especificaciones del Convertidor

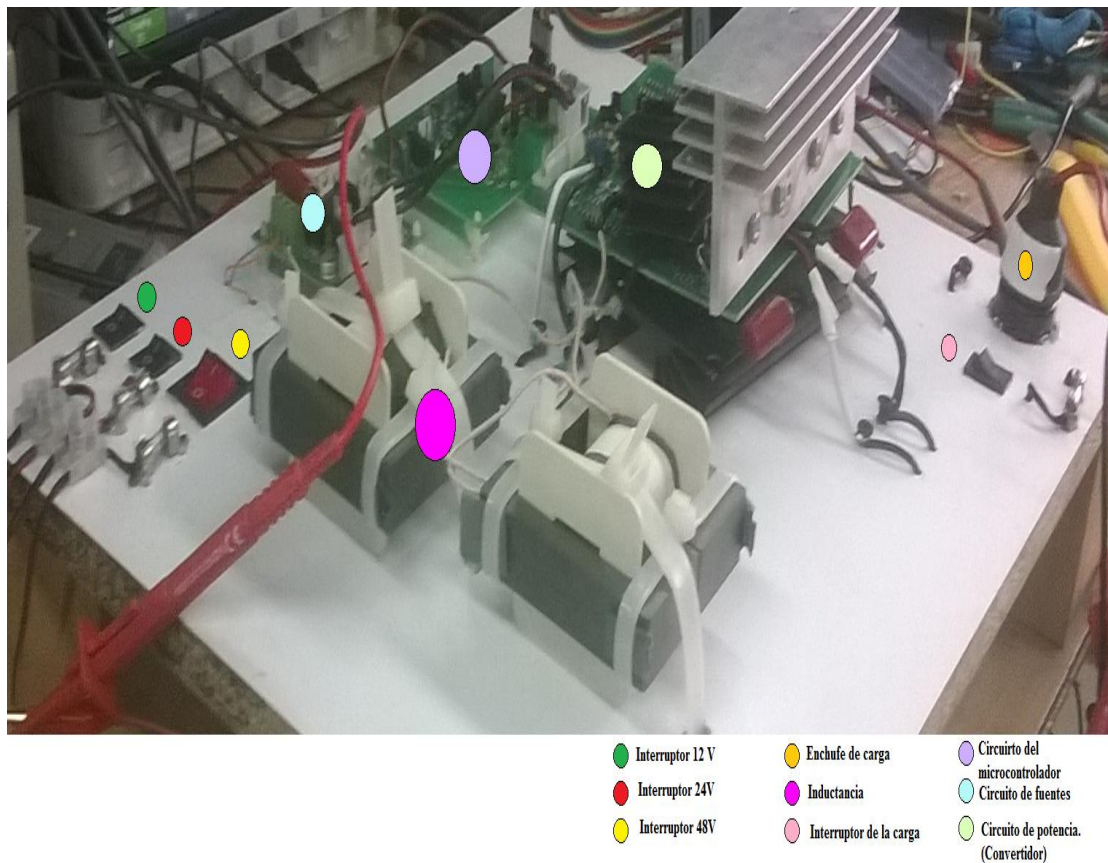


Ilustración 5 Foto Del Convertidor Con Soporte

2.2 SOFTWARE:

Se desarrolló un algoritmo (ver anexo 4 y su diagrama de flujo en el anexo 5) en Mplab, X IDE, para programar el micro controlador dspic33fj128mc, que deja la posibilidad de poder programar a través de un PICKIT 3 o de un ICD, a través de éste se puede controlar el convertidor y permitir manipular los estados de operación que son los siguientes:

- Estado encendido: Dos led encendidos, módulos apagados.
- Estado stand by: Led rojo encendido, módulos apagados.
- Estado Run: Led rojo encendido, módulos encendidos a través del arranque lento.

2.3 SISTEMA DE PRUEBAS HIDRÁULICO:

Se construyó un montaje de tuberías y sensores que permiten poner a prueba la electrobomba PKm 60 (ver “Manual de construcción y puesta en funcionamiento del montaje de pruebas hidráulicas de la electrobomba PKm60” en anexo6), este sistema adopta como entrada una rama del laboratorio de hidráulica de la facultad de ingeniería de la universidad, ésta a su vez entregaba el agua proveniente de una electrobomba de 2 HP, la cual determinaba las siguientes especificaciones para nuestro sistema:

Especificaciones	
Caudal máximo:	1 l/s
Presión Máxima:	30 psi (21,1 metros columna de agua, m.c.a)
Diámetro de tubería:	1 Pulgada
Sensores: Caudal: (Medidor con principio de operación por ultrasonido). Presión: 2 manómetros de 30 psi. (rosca de ¼ in) Manómetro de laboratorio de 60 m.c.a (manguera de conexión de ¼ in)	
Permite intercambiar de inyección de caudal a la electrobomba.	

Tabla 3 Especificaciones del Sistema de Pruebas Hidráulico

El montaje completo se hizo en el laboratorio de hidráulica de la facultad de ingeniería de la universidad de la manera como se muestra en la ilustración 7, aquí se aprecia cómo se distribuyeron los sistemas de medida, osciloscopio, DVM, analizador de línea, además de la carga de la electrobomba, las baterías, la placa de conexión de la electrobomba y el convertidor. Para mostrar cómo se hicieron las conexiones de la electrobomba mostrada en la ilustración 6, se puede remitir a la ilustración 8, donde se exponen los nombres de cada de las posibles conexiones en la electrobomba. Finalmente en la ilustración 9a y en la ilustración 9b se muestra el montaje de la electrobomba en forma directa y en forma inversa, se puede percibir que el cable negro conecta placa que se mostró anteriormente. Ver en anexo 7 el proceso de prueba que se realizó.

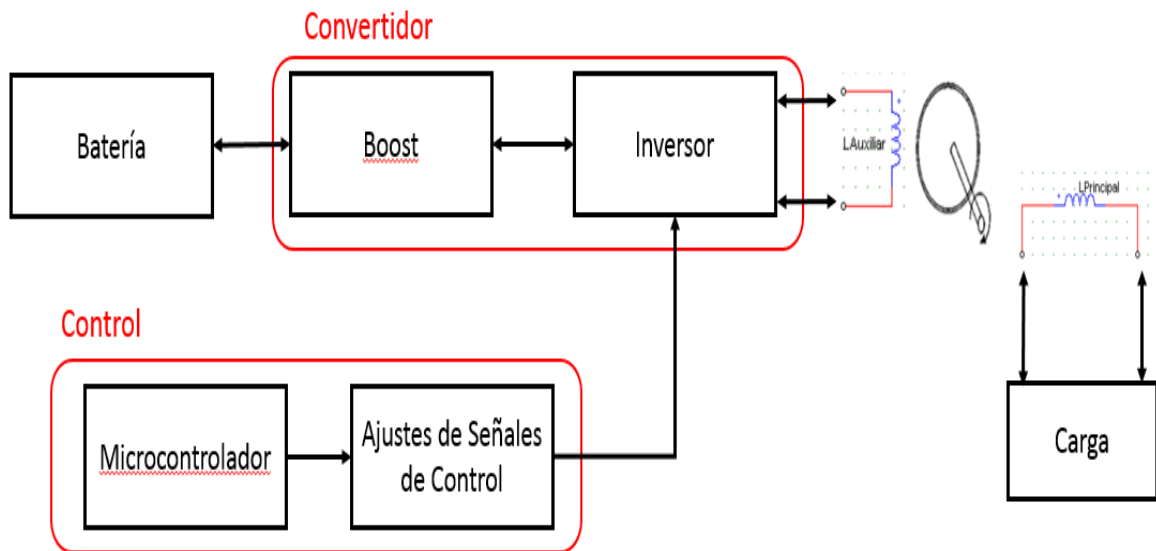


Ilustración 6 Conexión Electrobomba

Las conexiones al motor se hacen de la siguiente manera:



- **Sistemas de medición**
- **Convertidor**
- **Carga**
- **Baterías**
- **Placa de conexión**

Ilustración 7 Montaje Eléctrico

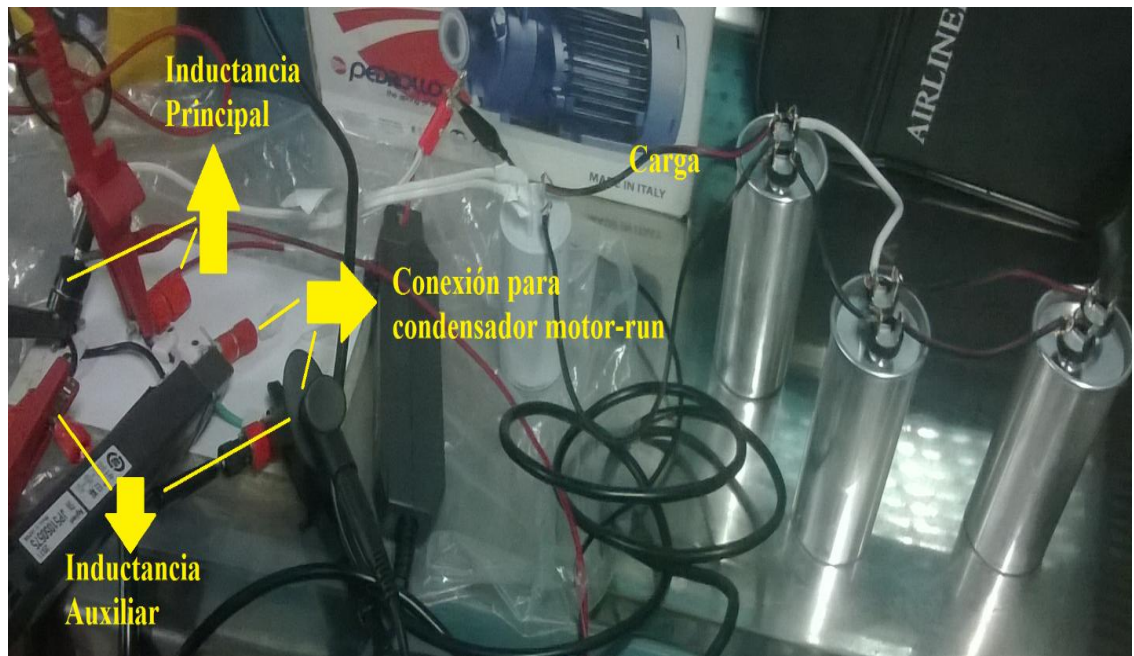


Ilustración 8 Conexiones Eléctricas de la Electrobomba



Ilustración 9a Montaje Hidráulico: Conexión Directa



Ilustración 9.b Montaje Hidráulico: Conexión Inversa

3. DESARROLLOS

3.1 CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DEL MOTOR DE LA ELECTROBOMBA PKm 60:

Para tener una idea general aproximada de la carga que manejará el convertidor se realizó una medición de la impedancia de los devanados del motor, los resultados son los siguientes:

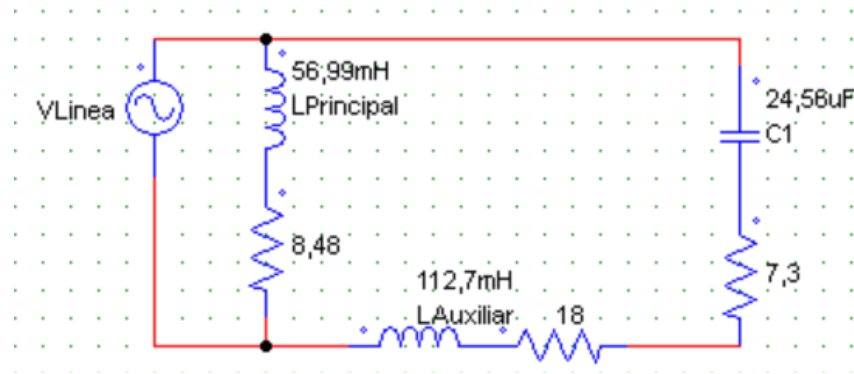


Ilustración 10 Modelo Eléctrico del Motor de la Electrobomba Pkm 60

Reduciendo el circuito, la impedancia equivalente para la línea sería:

$$Z_{eq} = 17,96 + j 23,05 = 29,22 \angle 52,075^\circ$$

Por otro lado, como verificación, al medir con el puente de impedancias Fluke PM6306 se obtiene:

$$Z_{eq} = 33,5 \angle 57,2^\circ$$

3.2 MODELO DE LA BOMBA CENTRÍFUGA DE TIPO PERIFÉRICA DE LA ELECTROBOMBA PKm 60:

Para entender mejor el comportamiento de la electrobomba como generador es necesario caracterizarla (Ilustración 11 y anexo 8) mediante la curva de la relación presión-caudal presentada por el fabricante [12].

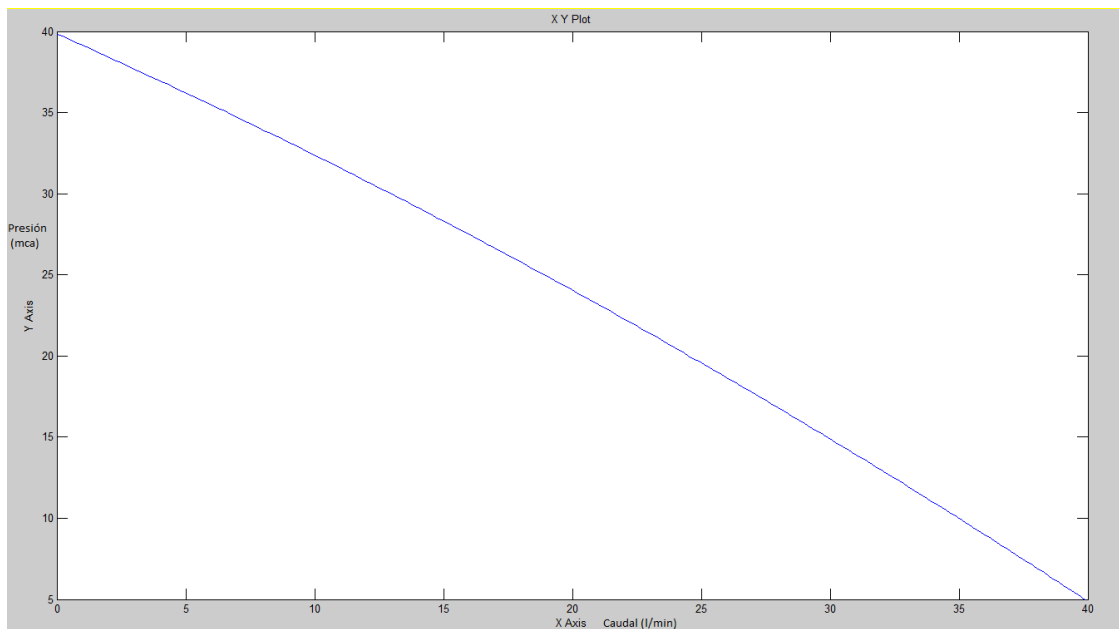


Ilustración 11 Relación Presión vs Caudal de la electrobomba.

3.3 DISEÑO DEL CONVERTIDOR BIDIRECCIONAL:

El primer subsistema a diseñar es el convertidor bidireccional. Como pudimos ver en la ilustración 6el convertidor se compone por una etapa Boost y un inversor de puente H. Inicialmente realizaremos el diseño de la fuente Boost sin considerar su conexión al inversor:

Parámetros:

$$V_{out} = 200V$$

$$V_{in} = 48V$$

$$P_{out} = 370W$$

$$\eta = 75\% \text{ (asumida para el peor de los casos)}$$

$$I_l = \frac{P_{in}}{V_{in}} = \frac{\frac{P_{out}}{\eta}}{V_{in}} \approx 10,27A$$

$$\Delta I_l = 5\% I_l \approx 514mA$$

$$I_{out} = \frac{370W}{200V} = 1,85A_{rms}$$

$$\Delta V_C = 2.5\% V_{out} = 5V$$

$$f = 100kHz$$

El voltaje de entrada es de 48 V, el cual es suministrado por 4 baterías recargables en serie con referencia 6FM65 marca Vision. Se pretende que la Boost eleve el voltaje en la salida a 200 V, para facilitar que la salida del inversor esté cercana a 110 Vrms. La potencia de salida se determinó como 370 W, pues la electrobomba es de 0,5 HP. De igual forma se definió una eficiencia mínima de 75 %, pues a pesar de que el objetivo menciona este parámetro en modo rectificador, se presume que por la bidireccionalidad del convertidor es necesario que se cumpla en modo inversor. Inicialmente se busca que la frecuencia de conmutación de la Boost sea 100 kHz con el fin de reducir el valor de la inductancia y el condensador en comparación a los componentes resultantes si se opera a menor frecuencia.

Aplicando las ecuaciones de la fuente Boost en modo continuo:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{(1-D)} \quad (1)$$

$$\Rightarrow D = 0,76$$

$$\Delta I_l = \frac{V_i * D * T}{L} \quad (2)$$

$$\Rightarrow L = 710 \mu\text{H}$$

Considerando la corriente de salida constante, para aproximar el valor del condensador de salida.

$$\Delta V_c = \frac{I_o * D * T}{C} \quad (3)$$

$$\Rightarrow C \approx 2,8 \mu\text{F}$$

Haciendo otro análisis, para nuestro convertidor la carga que verá la fuente Boost será un puente H, por tal razón se debe analizar la forma de corriente que exige esta configuración, para esto se tomará el caso de un puente H con filtro LC de salida. Este pide a la entrada una corriente descrita por esta ecuación [13]:

$$I_{salidaboost} = \frac{IV_o}{2V_i} \cos(\Phi) - \left(\frac{IV_o}{V_i} \cos(2\omega_1 t - \Phi) \right) = I_d + I_{d2} \quad (4)$$

Dónde:

$I_d = \frac{IV_o}{2V_i} \cos(\Phi)$ e $I_{d2} = \frac{IV_o}{\sqrt{2}V_i}$, que corresponden a los valores efectivos de la componente dc y de la componente de 120 Hz para nuestro caso.

V_o = Voltaje RMS de la fundamental = 110 V_{RMS}

V_i = Voltaje de salida de la Boost= 200 V_{RMS}

$I = 3,3 \text{ A}$

Φ =Desfase entre la corriente y el voltaje de la salida.

La ecuación (4) describe que la corriente de entrada está compuesta por una componente DC, y otra de 120 Hz, entonces se deben recalculan el valor del condensador y la inductancia para que la Boost cumpla con su objetivo y además pueda proteger la batería de la componente de 120Hz y de forma indirecta de la alta frecuencia que pueden calentar y dañar la batería.

Entonces se dimensionan los componentes como si la Boost actuará como un filtro de entrada del inversor:

Permitiremos 3,8 V de rizado en el voltaje de la inductancia y un rizado de corriente de 514 mA.

$$\frac{3,8 \text{ V}}{514 \text{ mA}} = 2 \pi * 120\text{Hz} * L \quad (5)$$

$$\Rightarrow L \approx 9,8 \text{ mH}$$

Luego, en el texto, se muestra el valor definitivo de inductancia que se decidió poner, dado que esta se puede alcanzar solo si se encuentran los materiales necesarios para construirla, pero se presentan los cálculos anteriores para mostrar cual es la función que se pretende que cumpla la inductancia.

Al condensador de salida de la etapa Boost le permitiremos 5V de rizado y la corriente RMS de salida con frecuencia de 120 Hz debe ser:

$$I_{d2} = \frac{IV_o}{\sqrt{2}V_i} = 1,28 \text{ A} \quad (6)$$

Aplicamos el nodo en fasores $1,65A + 514 \text{ mA} = 1,8 A$

$$\frac{5V}{1.8 A} = \frac{1}{2 \pi * 120 \text{ Hz} * C} \quad (7)$$

$$\Rightarrow C = 476 \mu F$$

Se usa una modulación para controlar la conmutación del puente H de tres niveles, que para generarla es necesario producir dos señales senos centradas en 0 V de amplitud 0,85 V (según el índice de modulación a usar), una desfasada 180° con respecto a la otra. Estas señales se comparan con una señal triangulo de 1 V pico a pico, centrada en 0,5 V. Esta modulación permite descansos de conmutación de medio ciclo de la frecuencia fundamental y al ser de tres niveles los saltos de voltaje se reducen a la mitad es decir, de 0 al voltaje de la Boost (V_{Boost}) y no como la modulación bipolar que tiene salto de V_{Boost} a $-V_{\text{Boost}}$ por lo tanto el sobre pico es menor.

El voltaje de salida en la mitad de cada rama respetará esta ecuación

$V_{o1} = V_{IN} * IM$, donde:

V_{o1} = Voltaje de salida de una de las ramas

V_{IN} = Voltaje de entrada del puente del H

IM = Índice de modulación

Este método tiene la ventaja de que las pérdidas por conmutación son menores, ya que cada rama descansa por medio ciclo de la seno, sin embargo cabe aclarar que la componente de la frecuencia de conmutación en el voltaje de salida queda en la misma frecuencia de conmutación, ósea, en 30 kHz y no en el doble como en la modulación unipolar [14].

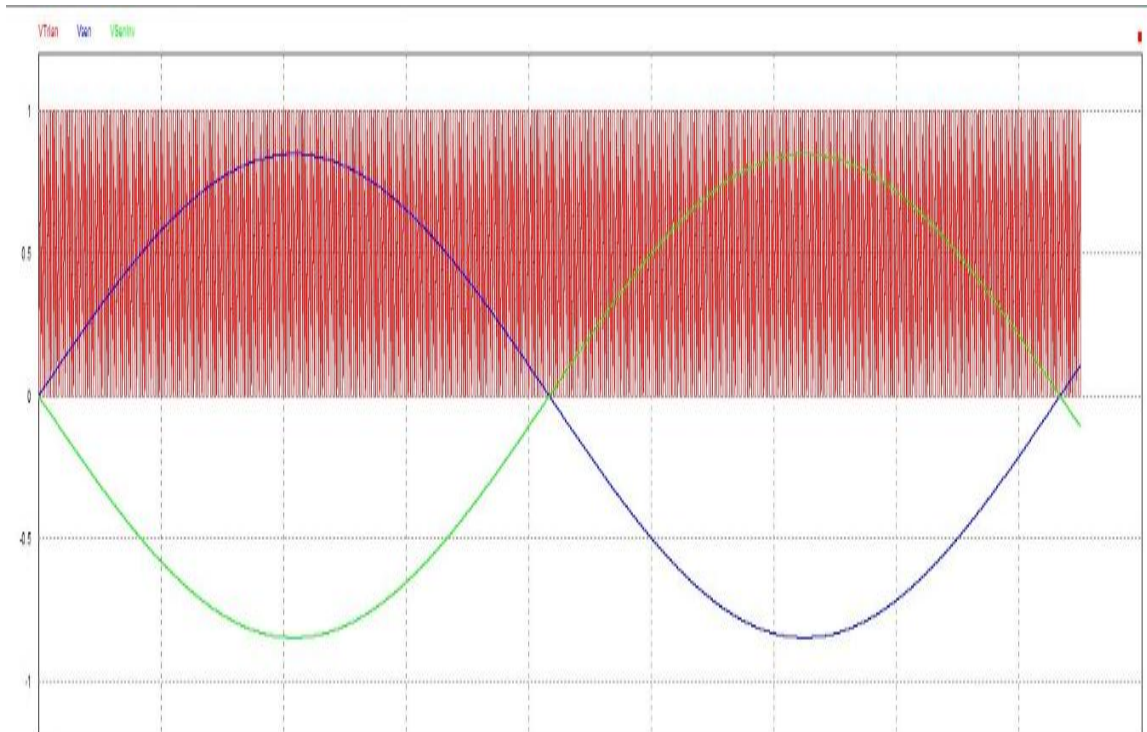


Ilustración 12 Modulación Implementada

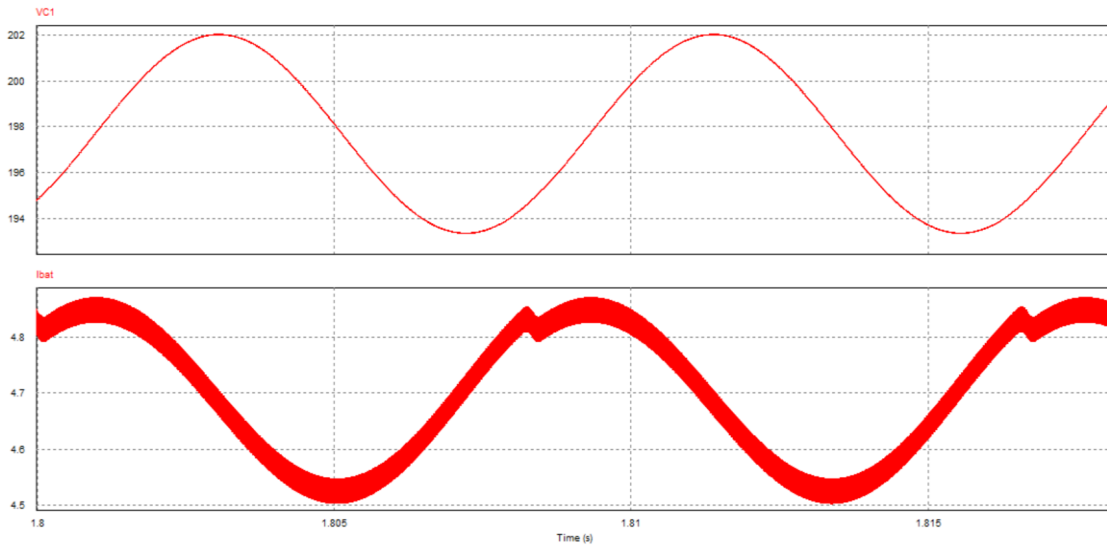


Ilustración 15 Acercamiento Simulación del Voltaje de Salida de la Fuente Boost y Corriente que Entrega la Batería con Respecto al Tiempo

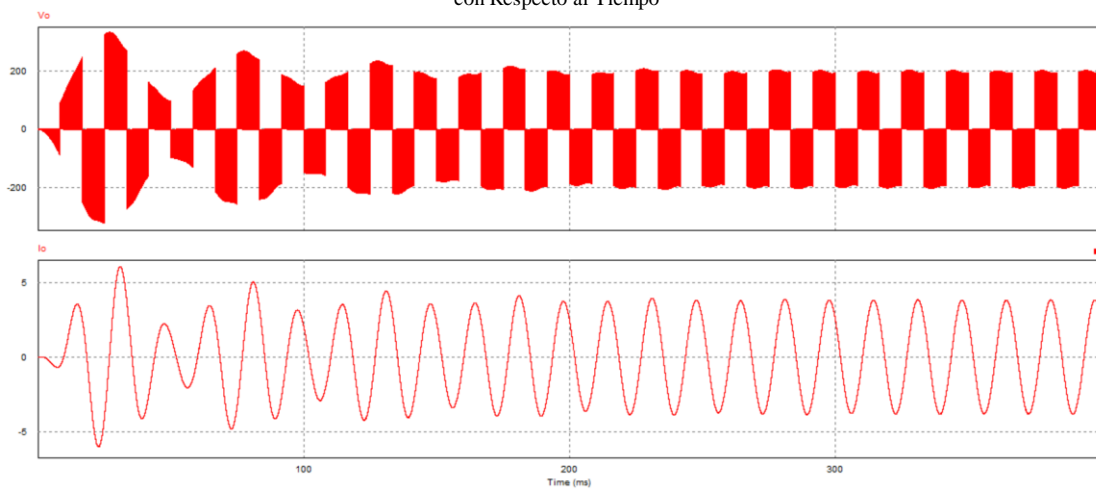


Ilustración 16 Simulación del Voltaje y Corriente de Salida del Inversor con Respecto al Tiempo

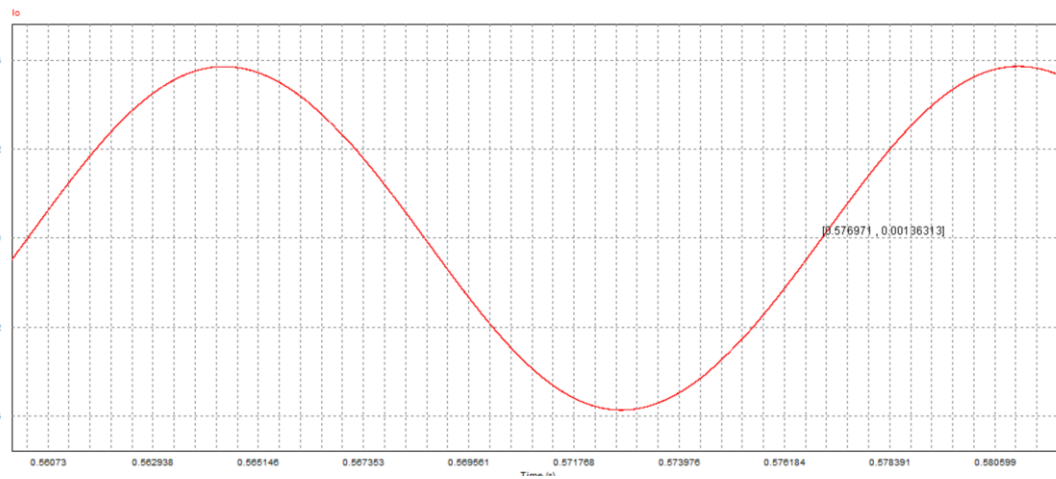


Ilustración 17 Simulación de la Corriente de Salida del Inversor con Respecto al Tiempo

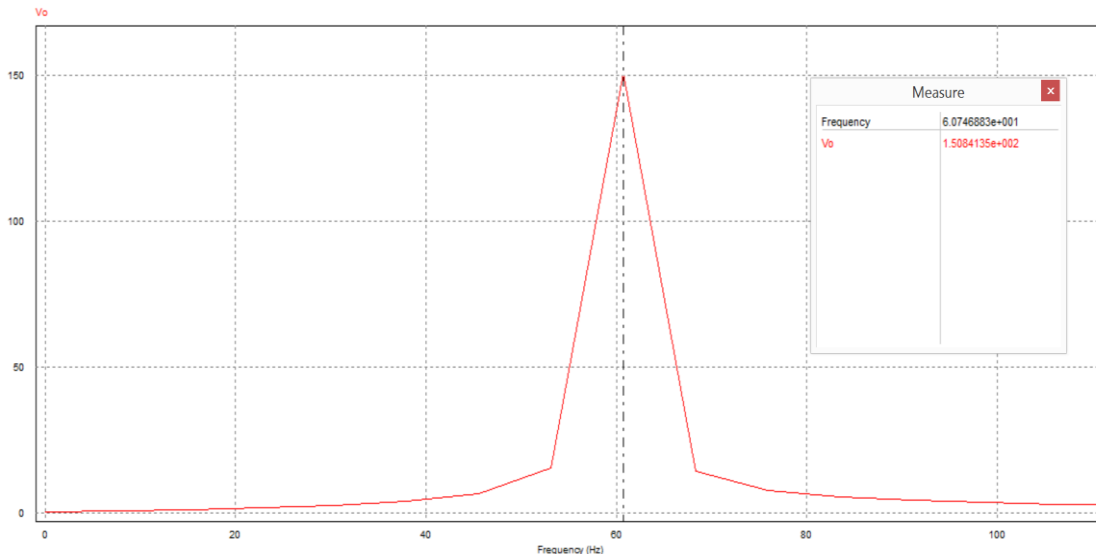


Ilustración 18 FFT del Voltaje de Salida del Inversor

En estos resultados obtenidos podemos ver que el sistema está funcionando de la forma apropiada, pues la salida de la fuente Boost es alrededor de 198 V, el rizado de corriente de la batería es menor que 500 mA y la salida del inversor es la modulación esperada (por medio de la ilustración 17 y la ilustración 18 se puede deducir que la frecuencia fundamental es 60.7 Hz y el voltaje pico es 150 V lo cual equivale a 106.6 Vrms).

Posterior a la verificación del convertidor en simulación es necesario definir los componentes y diseñar la elaboración de la inductancia a usar en éste.

Los Mosfets Q3 y Q4 debe soportar un $V_{DS} > 200$ V y una corriente máxima igual a la corriente entregada por la batería que suponiendo una eficiencia del 75 % sería 10,27 A. También es necesario que el Mosfet pueda conmutar a una frecuencia de 100 kHz y para reducir pérdidas de potencia que su resistencia drain-source de encendido sea baja.

Del mismo modo, los Mosfets Q1, Q2, Q5 y Q6 deben soportar un $V_{DS} > 200$ V y una corriente mayor a 3,82 A. También es necesario que el Mosfet pueda conmutar a una frecuencia de 100 kHz y para reducir pérdidas de potencia que su resistencia drain-source de encendido sea baja.

Teniendo en cuenta las condiciones mínimas necesarias y sobredimensionándolas con el fin de prevenir daños debido a diferencias con los valores esperados, se decide utilizar la referencia IRFP360, el cual es un Mosfet que cumple las condiciones mencionadas y se destaca el hecho de contar con un $r_{ds(max)} = 0.2 \Omega$ para $V_{GS} = 10$ V, $I_D = 14$ A y una temperatura de juntura de 25 °C [15].

Como se evidencia en la ilustración 13, los diodos D1, D2, D6, D8, D9 y D10 se utilizan para bloquear el paso de corriente por los diodos de body de los Mosfets los cuales tienen un tiempo de recuperación cercano a 500 ns. De igual forma, se busca que estos diodos en serie a los Mosfets tengan un tiempo de recuperación corto y un V_F bajo con el fin de tener menos pérdidas. En el caso de los diodos del puente H (D1, D2, D8 y de D10) es necesario que sean capaces de soportar una corriente promedio mayor a 1,27 A, pues aunque la corriente de salida tiene una amplitud cercana a 4 A, los diodos aproximadamente conducirían por medio periodo por lo que se usan los diodos con referencia 1N5822, los cuales son diodos tipo Schottky que soportan una corriente promedio de 3 A. Por otro lado, los diodos en serie a los Mosfets de la Boost deben soportar una corriente cercana a

10,27 A, por lo que inicialmente se pensaba usar los diodos Schottky con referencia lqa16t300, sin embargo se encontraron unos diodos FES16GT-E3/45 que aunque no son Schottky son lo suficientemente rápidos y además cuentan con un voltaje de conducción de 0,75 V para una corriente de 10 A y una temperatura de juntura máxima de 125 °C, mientras que el anterior presenta un voltaje de conducción de 1,25 V bajo las mismas condiciones.

Por otro lado, los diodos D3, D4, D5, D9, D11 y D12 son necesarios para brindar el carácter bidireccional al convertidor. Éstos diodos deben ser lo suficientemente rápidos para poder conmutar a 100 kHz y además soportar un V_{RRM} (Maximum repetitive peak reverse voltage) > 200 V. La única diferencia entre ellos es que por D1 y D2 circulará una corriente máxima de 10,27 A y por los demás diodos 4 A. La referencia seleccionada fue FES16GT-E3/45. Sin embargo, al probar el convertidor con estos diodos en paralelo los transitorios no alcanzaban a estabilizarse por la frecuencia de conmutación por lo que se cambiaron por diodos de carburo de silicio, los cuales se caracterizan por ser muy rápidos. Finalmente, los diodos en paralelo de la Boost (D3 y D9) fueron aquellos con referencia C3D10170H y los del puente H (D4, D5, D11 y D12) fueron C4D02120A. Para el cálculo de los disipadores se hizo un análisis de las pérdidas por conducción de cada Mosfet y se calculó la resistencia térmica de los disipadores que se necesita para cada componente analizado y se montó un disipador que superará las dimensiones requeridas (Ver anexo 9).

Por otro lado, es necesario definir las características de C1 (capacitor de la Fuente Boost). En primer lugar debemos tener presente que en el mercado el valor nominal más cercano es 470 μ F, así mismo el capacitor debe soportar un voltaje mayor a 200 V. Debido a lo anterior se decidió seleccionar el condensador electrolítico con referencia ESMQ451VSN471MR45S, del cual debemos resaltar que puede soportar un rizado de corriente de 2,53 Arms con una frecuencia de 120 Hz y una temperatura de 85 °C. El objetivo de poner este condensador es para que la Boost funcione como filtro de la componente de corriente de 120 Hz que exige el puente H, sin embargo es necesario decir que no se utilizó el valor de inductancia diseñada por razones que se explicarán más adelante, pero el valor del condensador debe mantenerse ya que este ayuda a filtrar y hace más estable el valor de voltaje de salida de la Boost. Adicionalmente se agregó un condensador en paralelo de poliéster de un valor de 4 μ F que es cercano al valor calculado para la Boost en el resultado de la ecuación 3, éste cumple la función de reducir la resistencia en serie del condensador equivalente.

Además fue necesario añadir un condensador de 2,2 μ F en cada una de las ramas para mantener estable el voltaje en este punto, puesto que los caminos del puente H quedaron un poco largos buscando mantener el espacio para la ubicación de un disipador compartido para los Mosfets del puente H.

Para diseñar la inductancia L1 del convertidor se empleó el núcleo de ferrita E80/38/20-3F3, es necesario tener en cuenta los siguientes parámetros:

- $L=9.8$ mH
- $I_{L \max} = \frac{370 \text{ W}}{48 \text{ V}} = 7,71$ A
- $A_e = 392 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ [16]
- $B=0,4$ T (no aparece el valor para nuestras condiciones en [17], pero se estima en ese valor)
- $J_{Litz} = 6 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$
- Cable Litz Calibre 16 (Disponible en Universidad)

Lo primero que debemos confirmar es que el cable litz disponible en la facultad soporte la corriente que circulará a través de la inductancia. Para ello debemos tener en cuenta que el área de cobre de un cable (A_{cable}) calibre 16 es 1.31 mm^2 , por lo que la corriente máxima que soportaría este cable ($I_{\text{max cable}}$) sería:

$$I_{\text{max cable}} = J_{\text{Litz}} * A_{\text{cable}} \quad (8)$$

$$\Rightarrow I_{\text{max cable}} = 7,86 \text{ A}$$

Con este resultado podemos ver que el cable soportaría la corriente que entregaría la batería al convertidor, sin embargo debemos tener presente que el peor caso sería cuando la eficiencia del convertidor fuera del 75 % y como la potencia de salida debe ser 370 W y el voltaje de entrada es 48 V la corriente máxima sería 10,27 A lo cual sería una corriente que no soportaría el cable. Sin embargo debemos recordar que el tiempo en el que la batería entregaría esa corriente sería muy corto, pues será solo mientras el motor supera la velocidad de sincronismo y opera como generador. Por lo que el calibre del cable Litz es suficiente.

Ahora debemos hallar el número de vueltas necesario para no saturar la inductancia:

$$n \geq \frac{L * I_{\text{MAX}}}{A_E * \Delta B} \quad [18](9)$$

$$\Rightarrow n \geq 482 \text{ vueltas}$$

Por otro lado, es necesaria la utilización de gap debido a que se deben realizar las 13 capas completas ($13 * 39 = 507$ vueltas):

$$l_{\text{gap}} = \frac{\mu_0 * A_e * n^2}{L} \quad [19](10)$$

$$\Rightarrow l_{\text{gap}} = 1,29 \text{ cm}$$

Sin embargo, al tratar de implementar la inductancia, debido al recubrimiento de seda con el que contaba el cable litz y a la pequeña separación inevitable entre vuelta y vuelta de la inductancia solo fueron posibles realizar 216 vueltas, además debido a que el fabricante no brindaba el valor de la densidad de flujo magnético que permitía el núcleo 3F3 en nuestras condiciones de temperatura y frecuencia, al realizar pruebas con el convertidor se evidenciaba que la inductancia se saturaba. Debido a lo anterior se decidió realizar un nuevo diseño de inductancia que consistía en disminuir el valor de la inductancia a 1 mH y además obtenerlo por medio de 2 inductancias en serie con el fin de evitar que se saturaran los núcleos. Al disminuir el valor de inductancia, se debe descartar la idea de que la Boost funcione como filtro de la corriente de 120 Hz, ya que no se puede alcanzar este valor de inductancia tan grande con el núcleo que se tiene disponible, a pesar de esto el condensador de la Boost debe ser igual de grande, ya que la Boost no puede entregar esta corriente AC. Por otro lado el hecho de disminuir el valor de la inductancia aumenta el rizado ocasionado por la frecuencia de conmutación del convertidor Boost, sin embargo como se debe proteger la batería de este rizado de corriente de 120 Hz ubicando un condensador en paralelo a las baterías recargables, que ayuda a disminuir la corriente de 120 Hz y también se atenúa la frecuencia de conmutación de la Boost. Al final de éste capítulo se presenta el diseño de la inductancia ya que hay un cambio en uno de los parámetros del cálculo de la inductancia.

Continuando con la descripción del circuito, para generar las señales de control a los gate de cada uno de los seis Mosfet del convertidor se usa un micro controlador DSPIC 33FJ128MC802, desde el cual se generará las señales de control y se gestionará el estado de operación del convertidor, para llevar a cabo esta labor. Se construye un algoritmo que realiza las siguientes tareas:

- Configura dos módulos independientes de PWM, para controlar cada uno de los bloques que compone el convertidor, estableciendo su respectiva frecuencia, tiempo muerto y ciclo útil, para el caso de la Boost, o la modulación, para el caso del puente H.
- Genera las señales seno y diente de sierra (Modulo de PWM) de forma interna para efectuar la modulación y usa un timer para controlar la frecuencia y la cantidad de muestras de la señal sinusoidal.
- Configura una interrupción externa producida por un pulsador para hacer la gestión manual del convertidor y un par de leds para indicar el estado de operación del convertidor, de esta forma se tienen tres estados de operación apagado (Par de leds encendidos), stand by (led rojo encendido) y run (led amarillo encendido).
- Configura un arranque lento del convertidor haciendo variar el ciclo útil de la Boost de 0% a 76%, a la velocidad que el usuario desee, esto para disminuir el efecto de los transitorios en el encendido.

En un principio se tenía pensado usar un circuito de adquisición de datos del convertidor para poder protegerlo por software usando AMC 1200 (amplificador aislado), un amplificador diferencial (LMP 7701) y un filtro antialiasing de primer orden pero se decidió no usarlo puesto que éste no era totalmente necesario, además este sistema requería de una mayor protección al ruido producido por el convertidor, dado que al probarlo las muestras tomadas del circuito se perdían en el ruido y no se podía realizar el control efectivamente. Esta es la razón por la cual en el layout y en el montaje de observan espacios para componentes que están vacíos.

Posterior a esta etapa se usan opto acopladores 6n137 para aislar la tierra del micro controlador de la tierra de potencia, éste dispositivo tiene una respuesta lo suficiente mente rápida para operar a 100 kHz, por otro lado el opto acoplador tiene una lógica de salida inversa lo que hace necesario el uso de una compuerta negadora CD4009. Finalmente se usa un driver IR2110 capaz de hacer conmutar un par de Mosfets, por esta razón se usaron 3, este permite hacer operar un Mosfet con sourceflotante usando un circuito de Bootstrap. Además fue necesario poner entre las salidas del driver y los gate de los Mosfets 3 resistencias en paralelo de 33Ω y un diodo con el cátodo hacia el driver con el fin de mejorar la respuesta de conmutación de los Mosfets.

Para este bloque de control se requieren distintos valores de voltaje de alimentación y el uso de tierras aislada. Por esta razón se diseñó un bloque de fuentes lineales, ya que solo se tiene como fuente de alimentación principal cuatro baterías de 12 V. Entonces se toman del conjunto de baterías 12 V y 24 V, y pasan a un circuito compuesto por:

- UA7815 se alimenta con los 24V, es el encargado de entregar 15 V referenciados a la misma tierra de potencia de las baterías con el que se alimentará los drivers IR2110.
- LM2940 se alimenta con 12 V y se encarga de entregar 5V con la misma tierra de las baterías. Sirve para polarizar Los drivers y los optoacopladores.
- Dcr021205 se alimenta con 12 V, es un regulador que aísla eléctricamente la tierra de entrada con respecto a la de salida y entrega 5 V.

- LM2940 Se alimenta con los 5 V del dispositivo anterior y su respectiva tierra y se encarga de alimentar el DSPIC 33FJ128MC802.

Luego de revisar los resultados obtenidos con el convertidor operando a 100 kHz se identificó que las pérdidas por conmutación eran muy significativas lo cual se reflejaba en una mayor temperatura de los componentes y una eficiencia muy baja. Por lo tanto, se decidió disminuir la frecuencia de conmutación de la Boost a 25 kHz y la del puente H a 30 kHz. Lo que generó que el convertidor entregara 370 W a una temperatura apropiada y una eficiencia aceptable, sin embargo este cambio conlleva a que la cantidad de muestras por ciclo de la sinusoidal fuera menor y que la componente de la frecuencia de conmutación de la señal de salida se acerque más a la componente fundamental. Al bajar la frecuencia de conmutación de la Boost fue necesario recalcular los valores de condensador e inductancia y los resultados fueron $C1=9,37 \mu\text{F}$ y $L1=2,36 \text{ mH}$.

Es de notar que la inductancia que requiere la Boost es mayor al valor que se había decidido anteriormente de 1 mH, pero se mantiene la decisión de éste valor de inductancia obteniéndolo por dos inductancias en serie de 500 mH, puesto que usando dos núcleos no fue posible alcanzar un mayor valor sin que saturen y agregar más inductancias en serie implicaba aumentar considerablemente las pérdidas por conducción del convertidor. Por esto se recomienda realizar esta inductancia con un núcleo con mayor área efectiva.

A continuación se muestra el diseño de una de las inductancias que forman parte de la inductancia equivalente definitiva:

- $L=0,5 \text{ mH}$
- $I_{L \text{ max}}=10,27 \text{ A}$
- $A_e= 392 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ (núcleo E80/38/20-3F3)[16]
- $B_{\text{max}}=0,3 \text{ T}$ (no aparece el valor para nuestras condiciones en [17], pero se redujo el valor debido a que antes se saturó)
- $l_g=0,184 \text{ m}$
- $\mu_e=1710$
- Cable Litz Calibre 16 (Disponible en Universidad)

Es necesario aclarar que no se usaron las ecuaciones 8,9 y 10, pues para ser más estrictos en el cálculo se tendrán en cuenta la reluctancia del núcleo y del gap como lo plantea inicialmente la referencia [20]:

$$R_c = \frac{l_c}{\mu_0 * \mu_e * A_e} \quad (11)$$

$$\Rightarrow R_c = 2,184 \times 10^5 \text{ A/Wb}$$

$$R_g = \frac{l_g}{\mu_0 * A_e} \quad (12)$$

Asumiendo un $l_g=2,4 \times 10^{-3} \text{ m}$ con el fin de que no sea muy grande para evitar fugas de campo magnético

$$\Rightarrow R_g=4,872 \times 10^6 \text{ A/Wb}$$

Con lo anterior podemos decir que la reluctancia total es:

$$R_T = R_c + R_g = 5,09 \times 10^6 \text{ A/Wb} \quad (13)$$

Con el resultado de la ecuación 12, podemos hallar el número de vueltas (13) y comprobar que la corriente (14) que soportarán las inductancias será mayor a la que realmente circulará:

$$n = \sqrt{L * R_T} \quad (14)$$

$$\Rightarrow n = 51 \text{ vueltas}$$

$$I_{max} = \frac{B_{max} * R_T * A_e}{n} \quad (15)$$

$$\Rightarrow I_{max} = 11,7 \text{ A}$$

A continuación se encuentran algunas imágenes del circuito esquemático definitivo del circuito de potencia (ver ilustración 19 y 20). Es necesario aclarar que dentro del anexo 10 en la carpeta “Circuito de Potencia Final” podrá encontrar los archivos de donde fueron tomadas las imágenes de los esquemáticos. Sin embargo, inicialmente se había considerado la posibilidad de sensor algunas señales que luego fueron descartadas, pero los espacios para los componentes quedaron desocupados en el circuito impreso. Estos últimos archivos también podrá encontrarlos dentro del anexo 10 en la carpeta “Circuito de Potencia Inicial”. Finalmente el circuito digital y el de fuentes también los podrá encontrar en el anexo 10.

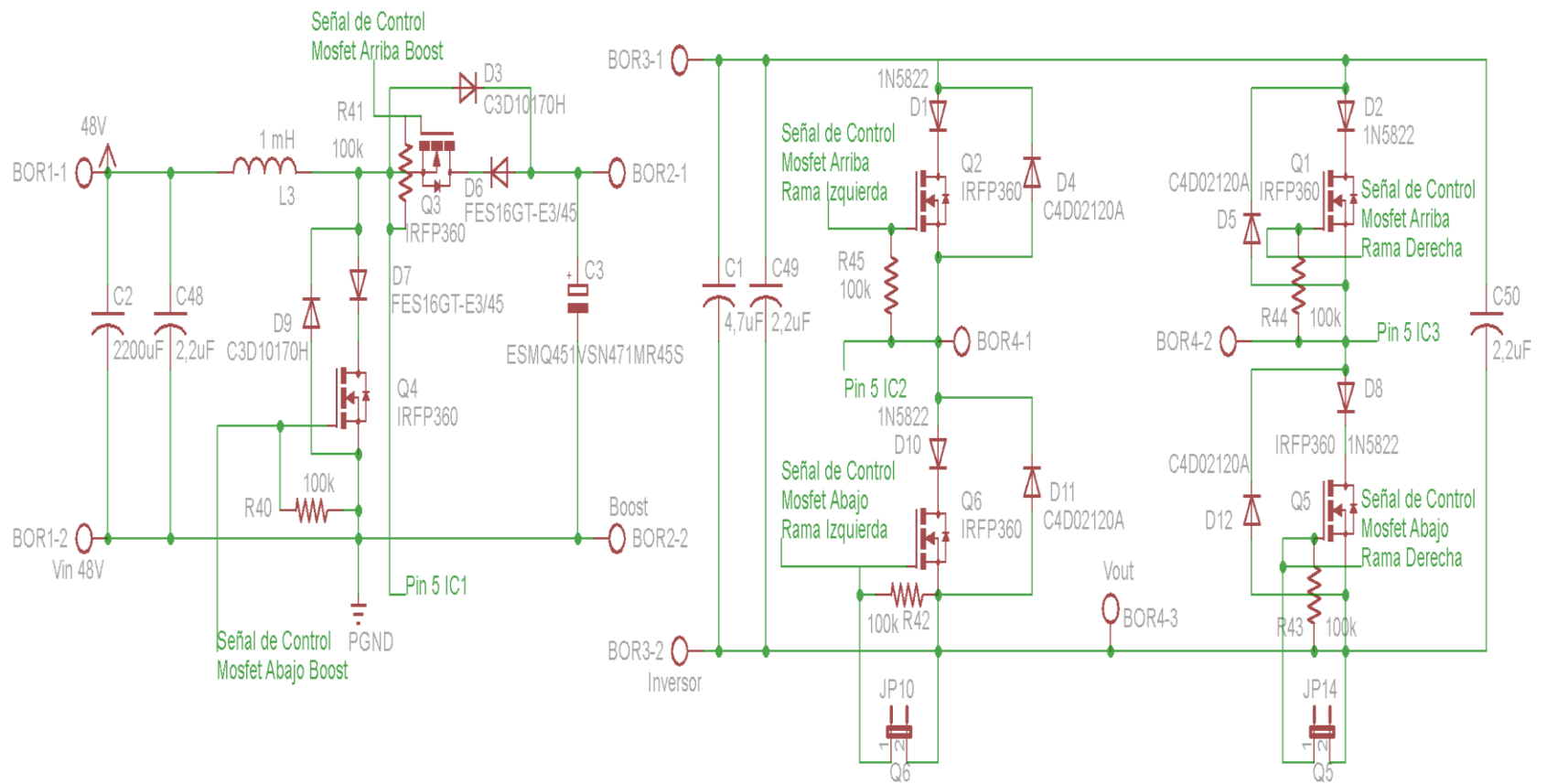


Ilustración 19 Circuito Esquemático Boost y Puentes H

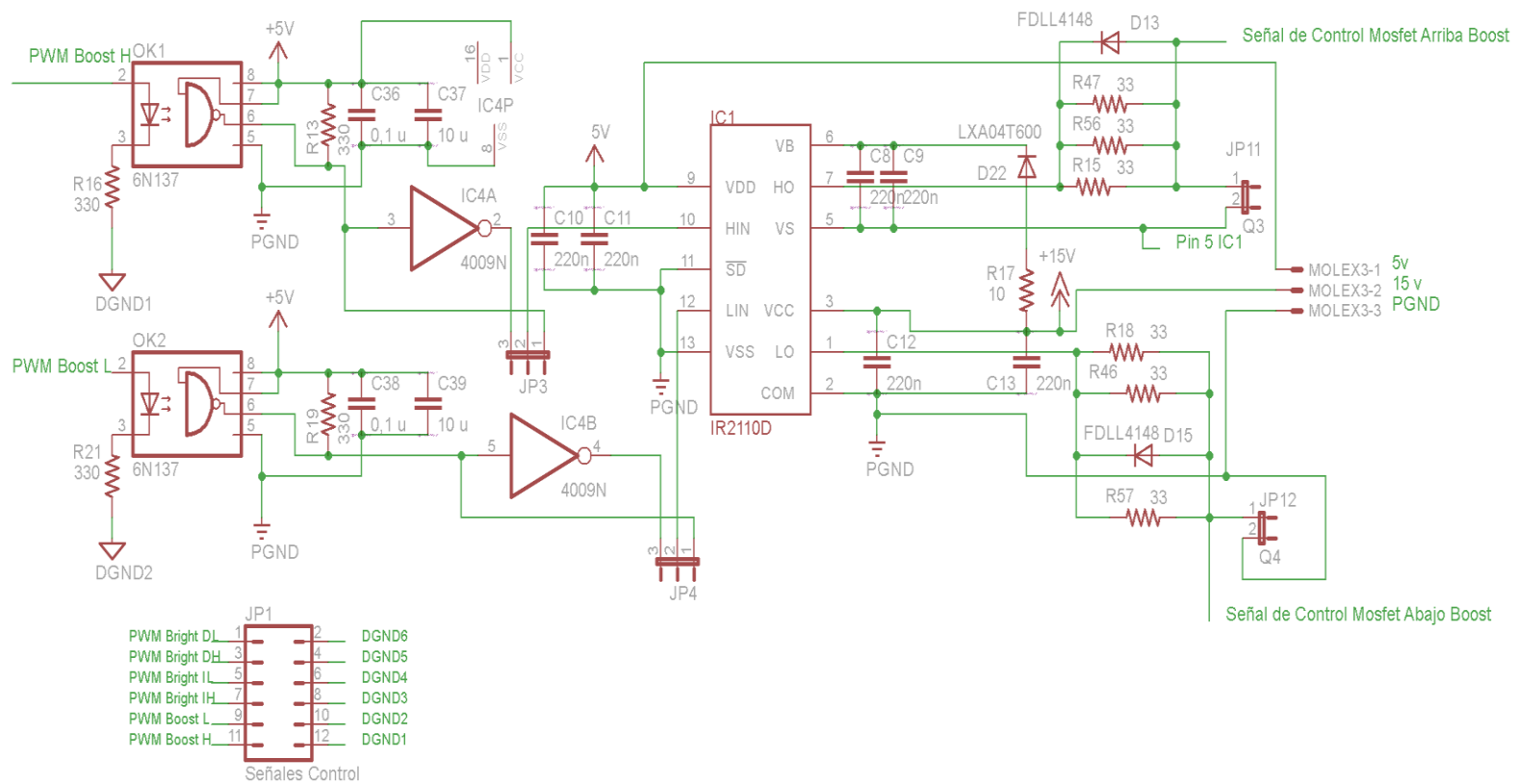


Ilustración 20 Circuito de Señales de Control de la Boost

4. ANALISIS DE RESULTADOS

Para el análisis de los resultados se hizo una primera prueba de laboratorio, que se describe en la sección 4.1, ésta se presenta para mostrar que se alcanzan las especificaciones requeridas para energizar la electrobomba, poniéndolo a condiciones de máxima potencia. Luego en la sección 4.2 se muestra el análisis de los resultados del sistema completo conectado, es decir, el convertidor teniendo como carga la electrobomba a distintas condiciones hidráulicas.

Vale la pena describir en este punto la forma en que se midió la potencia: Se usó la herramienta de análisis de eficiencia del osciloscopio MSOX4034A, que entrega el valor de la potencia de entrada, la de salida y el valor de la eficiencia, entonces para esto se debe configurar a que señal (voltajes y corrientes) corresponde cada canal para que el osciloscopio pueda hacer las operaciones que se requieren. Por otro lado es necesario configurar las puntas ajustando los offset y también el skew (desviación en tiempo de una sonda con respecto a la otra), a través del circuito deskew u1880.

4.1 RESULTADOS DEL CONVERTIDOR EN MODO INVERSOR:

El convertidor diseñado se probó en condiciones de laboratorio, usando como alimentación la fuente MAGNA-POWER XR-125-16 D, poniendo un voltaje de entrada de 48 V con una limitación de 11 A y se puso una carga que permitiera alcanzar 370 W de salida usando reóstatos para poner un valor de 27,41 Ω . Entonces se encontró que el convertidor presenta un eficiencia de 78,3%, es decir, en este punto de operación se tiene 476 W a la entrada y 373 W a la salida, cumpliendo de esta manera con el requerimiento de la potencia de salida. Cabe resaltar que previo a estas medidas se dejó funcionando el convertidor durante un tiempo considerable haciendo que sus componentes lleguen a una temperatura estable, por lo que se puede afirmar que su eficiencia es mayor cuando el convertidor está frío

El convertidor entrega la señal esperada (ver ilustración 21), mostrando la modulación de tres niveles usada para hacer conmutar el puente H. Podemos ver que tiene voltaje pico de 167 V, que es el valor de voltaje que está entregando la Boost menos los voltajes de conducción de los semiconductores con estas condiciones de carga, esto permite decir que la Boost cambia su voltaje de salida dependiendo de la carga que se le exija, este comportamiento se presenta por qué no se tiene un circuito de regulación, sin embargo es un valor de voltaje que permite cumplir la especificación de voltaje RMS de salida del convertidor completo de $110V \pm 30V$, teniendo un voltaje efectivo de 123,9 V. En la parte alta de la señal se nota una oscilación de 120 Hz este se produce por el rizado de la salida de la Boost que luego se analizará. Por otro lado en la ilustración 22 se puede verificar por medio de la función FFT del osciloscopio MSO-X-4034A (centrada en 60 Hz y en una ventana de 600 Hz) que el valor de frecuencia de la componente fundamental es 60 Hz y su valor de voltaje eficaz es 89,966V. Además en la ilustración 23(FFT de V_o centrada en 40 kHz y en una ventana de 90 kHz) vemos las armónicas más relevantes, que están a 30kHz, que es la frecuencia de conmutación del puente H y sus respectivos múltiplos, esto se debe al tipo de modulación que usamos, se puede dar cuenta que las armónicas más grandes están alejadas de la fundamental y que el valor de voltaje de esta componente de 30kHz es de 26,98 V.

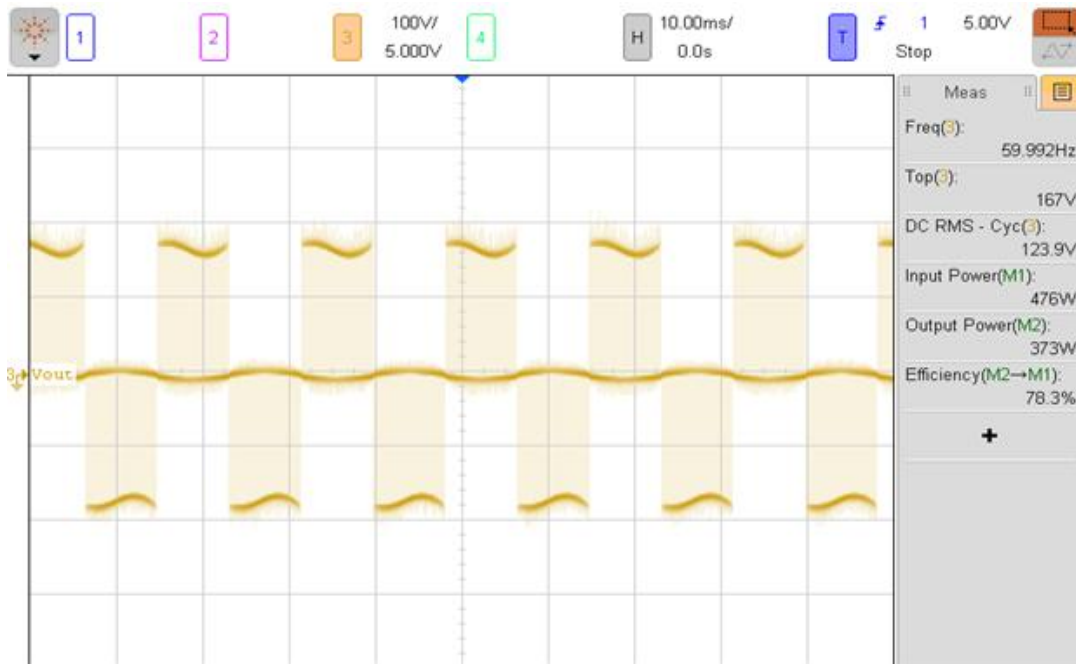


Ilustración 21 Voltaje de Salida del Convertidor

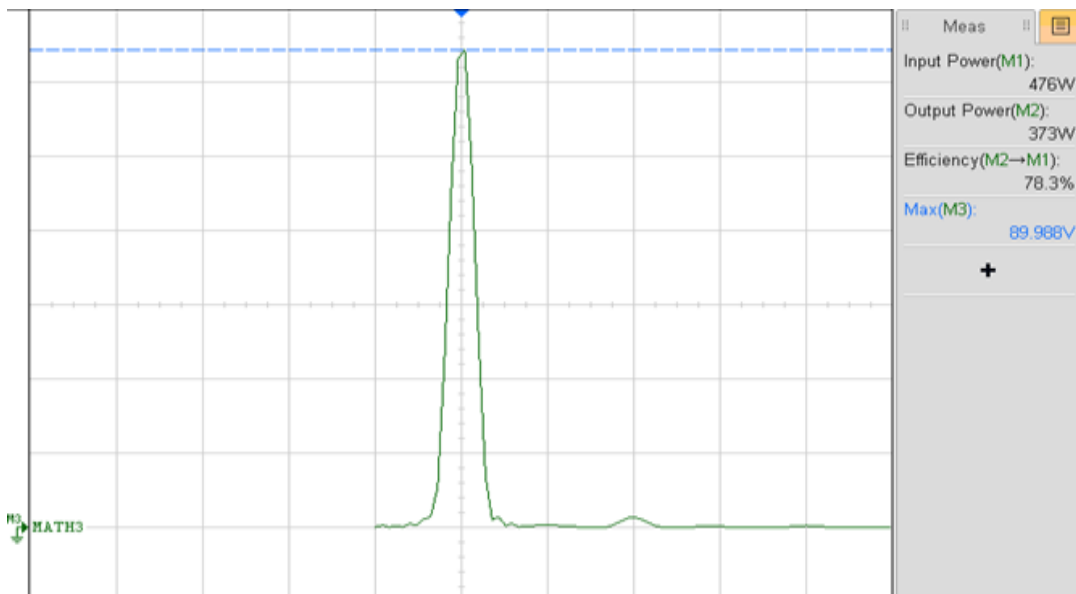


Ilustración 22 FFT del Voltaje de salida del Convertidor en Ventana de 600 Hz

La corriente de salida mostrada en la ilustración 24 es la corriente que exige la carga de $27,41 \Omega$, su forma sinusoidal se presenta debido a que los reóstatos usados tienen una inductancia parásita considerable que hace filtrar la corriente, sin embargo no se filtra exactamente la componente fundamental, por esta razón se ve el ruido montado en la señal. El valor RMS de esta corriente es de 3,6 A y su frecuencia fundamental es 60 Hz, aspecto que se puede verificar con la línea delgada verde oscuro que presenta la FFT de la corriente.

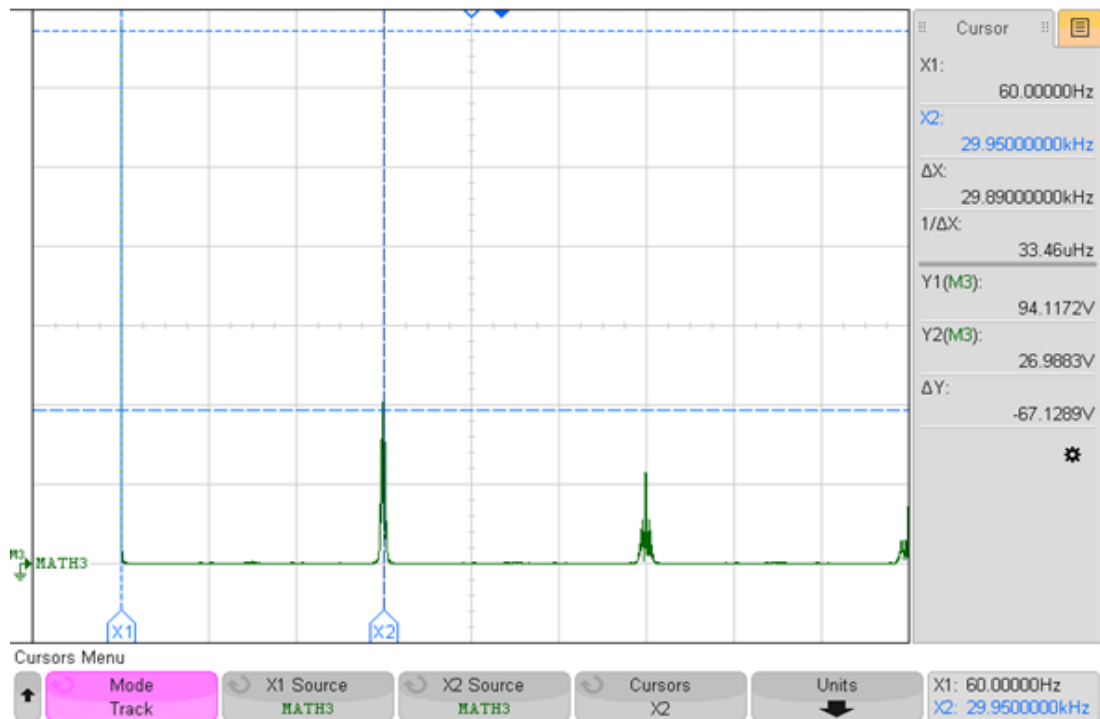


Ilustración 23 FFT del Voltaje de salida del Convertidor en Ventana de 90 kHz

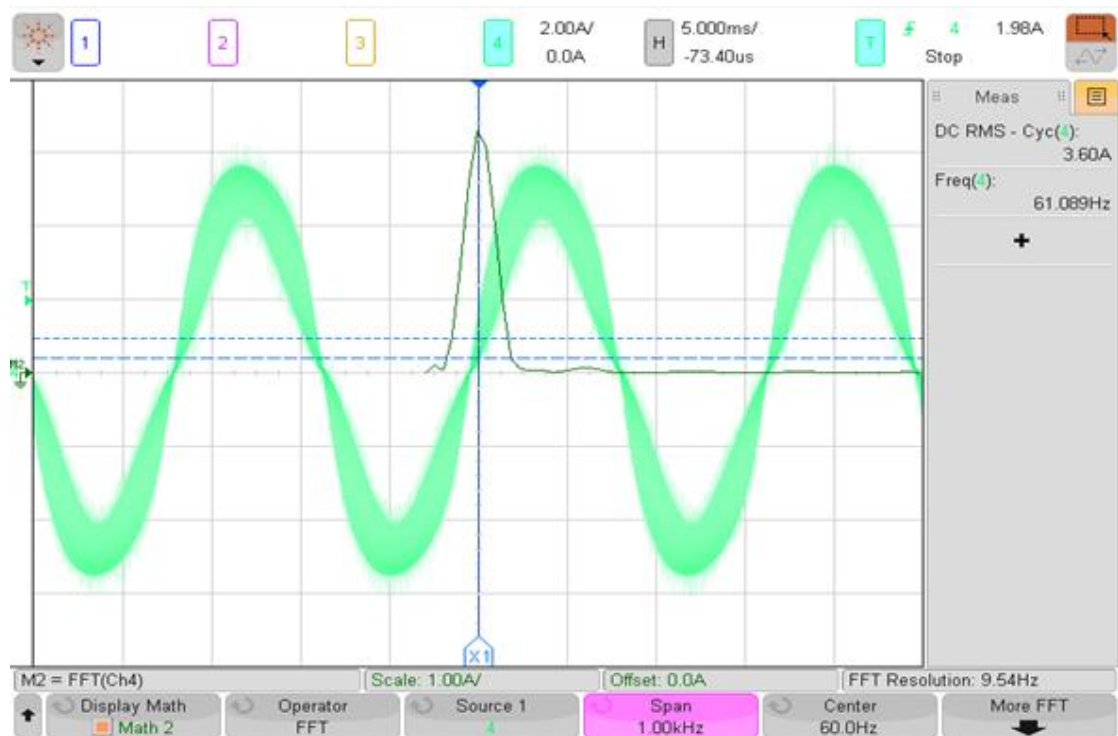


Ilustración 24 Corriente de salida y FFT de la corriente de salida (centro 60 Hz y una ventana de 1 kHz).

El voltaje de entrada al convertidor se presenta en la ilustración 25, aquí se logra apreciar que el voltaje promedio es 46,76 V, a pesar de que el voltaje de la fuente se configura en 48 VDC, pero por

efecto del rizado que genera el convertidor, el valor promedio no es el mismo. Este rizado tiene una amplitud de 5,2V y una frecuencia cercana de 120 Hz, lo que permite decir que es generado por la corriente de 120Hz que viene del puente H y que se había previsto en los cálculos del convertidor.

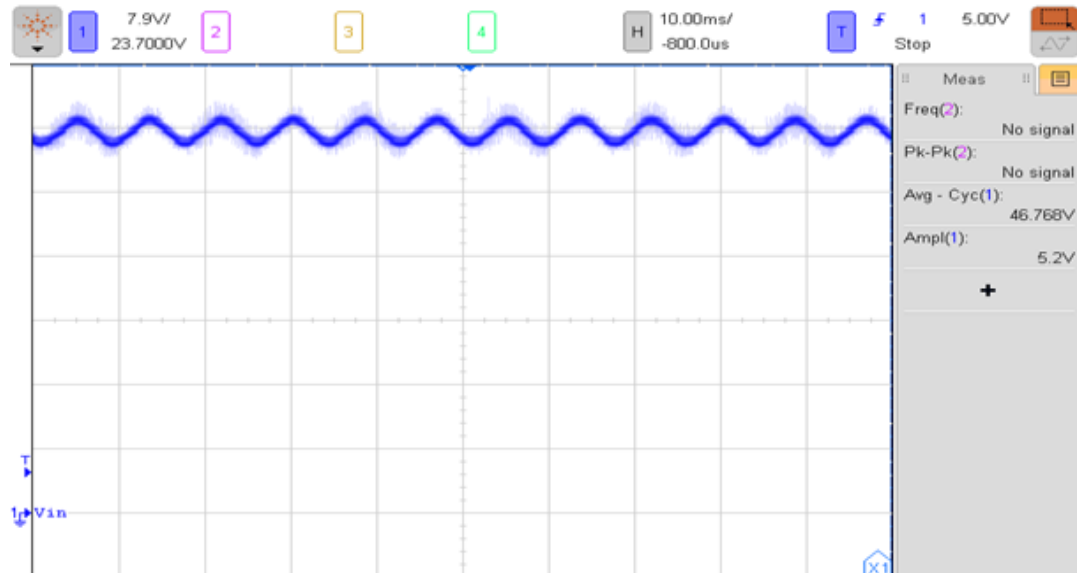


Ilustración 25 Voltaje de Entrada

La corriente de entrada es la presentada en la ilustración 26, donde se puede ver que el rizado de 120 Hz es el de mayor amplitud, de 2,48 A que representa el 26% del promedio de la corriente de entrada, sin embargo se recomienda hacerla más pequeña implementando un filtro LC, dado que hacer que la batería entregue esta amplitud de corriente AC disminuye su tiempo de vida útil. Sobre La corriente de 120Hz se observa un rizado grande que no pertenece al convertidor pues no coincide con ninguna de las frecuencias usadas en el convertidor, éste aparece por la gran longitud de los cables que conectan la fuente Magna Power al convertidor y permite que entre ruido. Además la componente de la frecuencia de conmutación de la Boost, 25 kHz, está presente y tiene una amplitud de aproximadamente 500mA, ésta se puede apreciar en la ilustración 27.

Pasamos a explicar detalles internos del convertidor, primero se analizará el comportamiento de la inductancia de la Boost. En la ilustración 28 se puede observar que la corriente y el voltaje de la inductancia, cuentan con la forma de onda de onda esperada, en este punto se pueden identificar el valor de la inductancia:

$$L = \frac{46,76 * 30,2 \mu s}{1,3A} = 1,08 mH$$

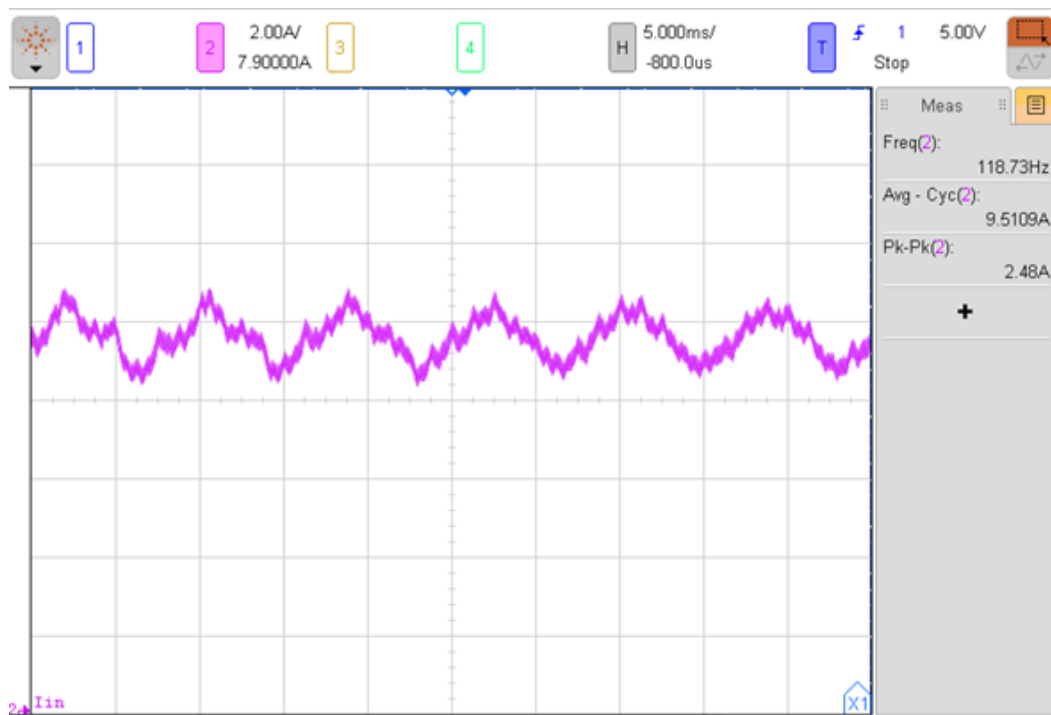


Ilustración 26 Corriente de Entrada del Convertidor, con Tiempo por División de 5ms.

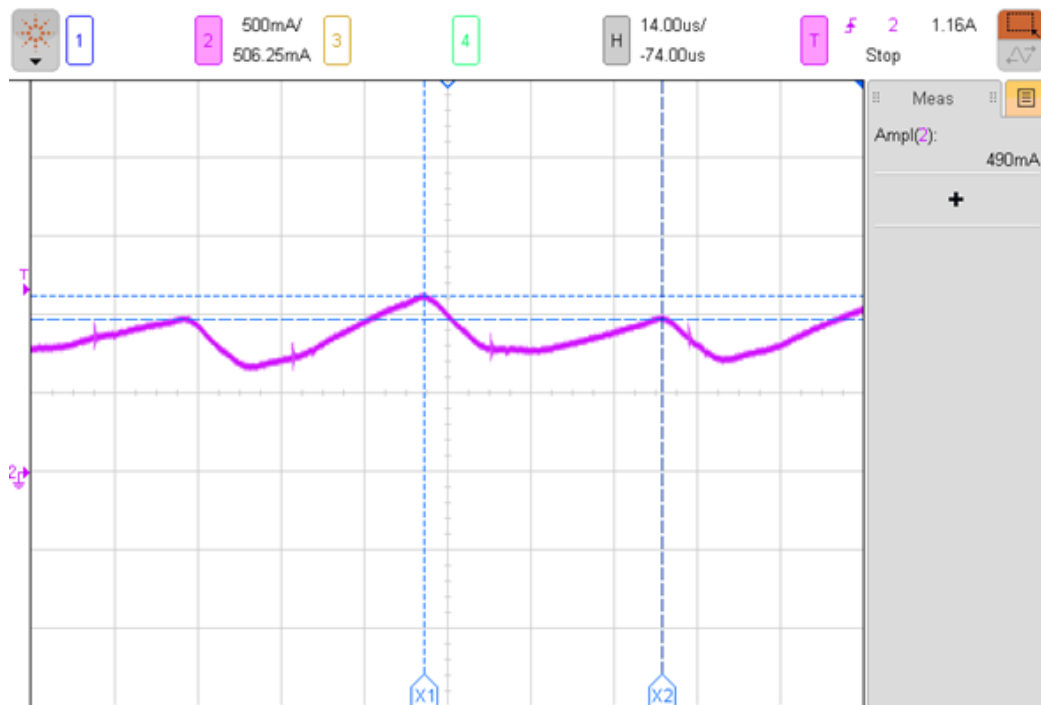


Ilustración 27 Corriente de Entrada del Convertidor, con Tiempo por División de 14ms

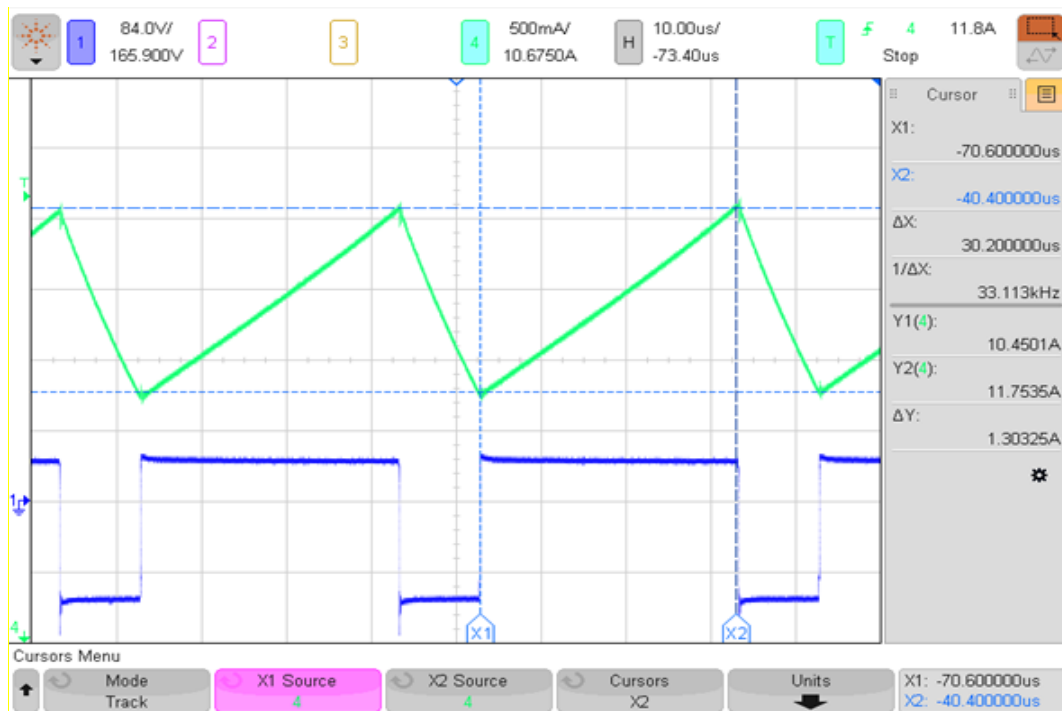


Ilustración 28 Verde: Corriente de la Inductancia de la Boost. Azul: Voltaje de la Inductancia de la Boost.

Luego del proceso de diseño, la frecuencia de conmutación de la Boost quedó definitivamente en 25 kHz, lo que permitió bajar las pérdidas por conmutación pero hizo crecer la corriente en la entrada, en la ilustración 29, se puede verificar las señales de control de la Boost viendo los voltajes gate-source de cada Mosfet, su frecuencia y el ciclo útil correspondiente, aunque se configuró a través del micro controlador que lo fuera cuando las señales pasan por todo el circuito de control se presenta un retraso, por este motivo el ciclo útil medido es de 75,81 %, no es exactamente 76%. Además en este punto es importante mencionar que el tiempo muerto configurado a través del microcontrolador fue el más pequeño posible, es decir 25ns, esto para hacer que el tiempo en el que la corriente de la inductancia pueda quedar sin camino de conducción sea el menor.

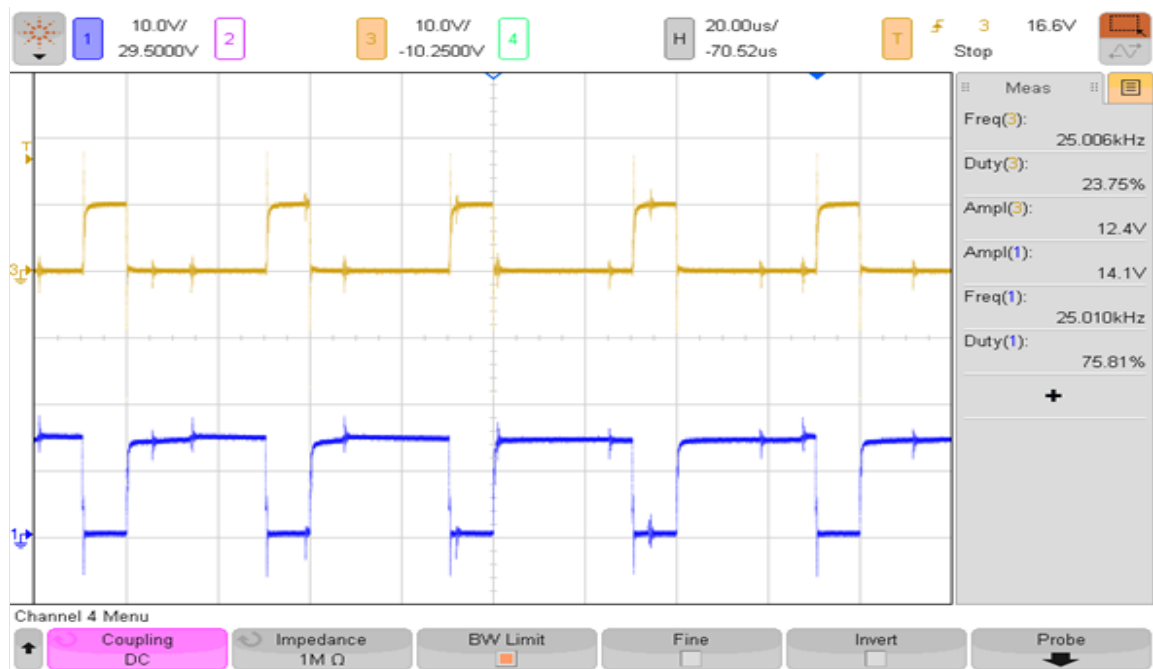


Ilustración 29 Amarillo: Voltaje Gate-Source del Mosfet de abajo de la Boost.
Azul: Voltaje Gate-Source del Mosfet de Arriba de la Boost.

Ahora se analizará el voltaje de salida de la Boost, se aprecia en la ilustración 30, como se había dicho en el análisis del voltaje de salida del convertidor, el voltaje promedio de salida de la Boost es 171,05 V, este tiene un rizado de 120 Hz de amplitud 20 V, producido por la corriente de 120 Hz que exige el puente H, a partir de este resultado se aconseja que poner un condensador más grande para filtrar aún más la corriente de 120 Hz y hacer que el voltaje sea estable, esto también se reflejará en la reducción de la oscilación de 120 Hz en el voltaje de salida del convertidor. Este argumento también sustenta el hecho de dejar el condensador de 470 μ F en paralelo al condensador de la Boost, en otras palabras se puede decir que no es posible que la Boost diseñada con las ecuaciones 2 y 3 funcione de manera correcta ya que no soportaría la corriente de 120 Hz.

En la ilustración 31 se aprecia los voltajes gate-source de una de las ramas, con esto se puede identificar que la frecuencia de conmutación es 30 kHz y que el tipo de modulación que se hace. En esta modulación los Mosfets de arriba descansan medio ciclo de la señal seno, es decir no hay pérdidas ni por conmutación ni por conducción, mientras los Mosfets de abajo en un medio ciclo de la seno están encendidos, por lo tanto tienen pérdidas por conducción y no por conmutación y en el otro medio ciclo conmutan pero no conducen. Para mayor claridad se presenta la ilustración 32 donde se muestran en simultáneo los voltajes de salida de cada rama con una resolución de 200ns por división, en esta imagen se nota el cambio de trabajo de cada rama, es un buen ejemplo para entender sobre todo el trabajo de los Mosfet de arriba. Allí también se nota que el tiempo muerto definitivo queda de aproximadamente 100ns, este se reduce por los retrasos del circuito de control ya que se configuró desde el microcontrolador a 200ns.

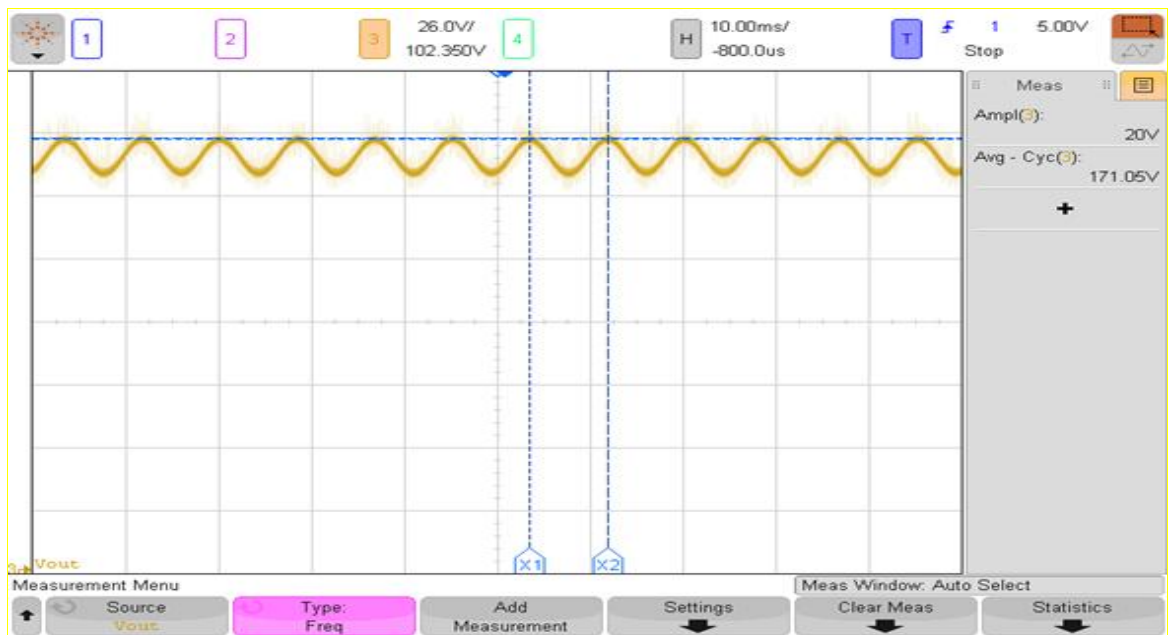


Ilustración 30 Voltaje de salida de la Boost

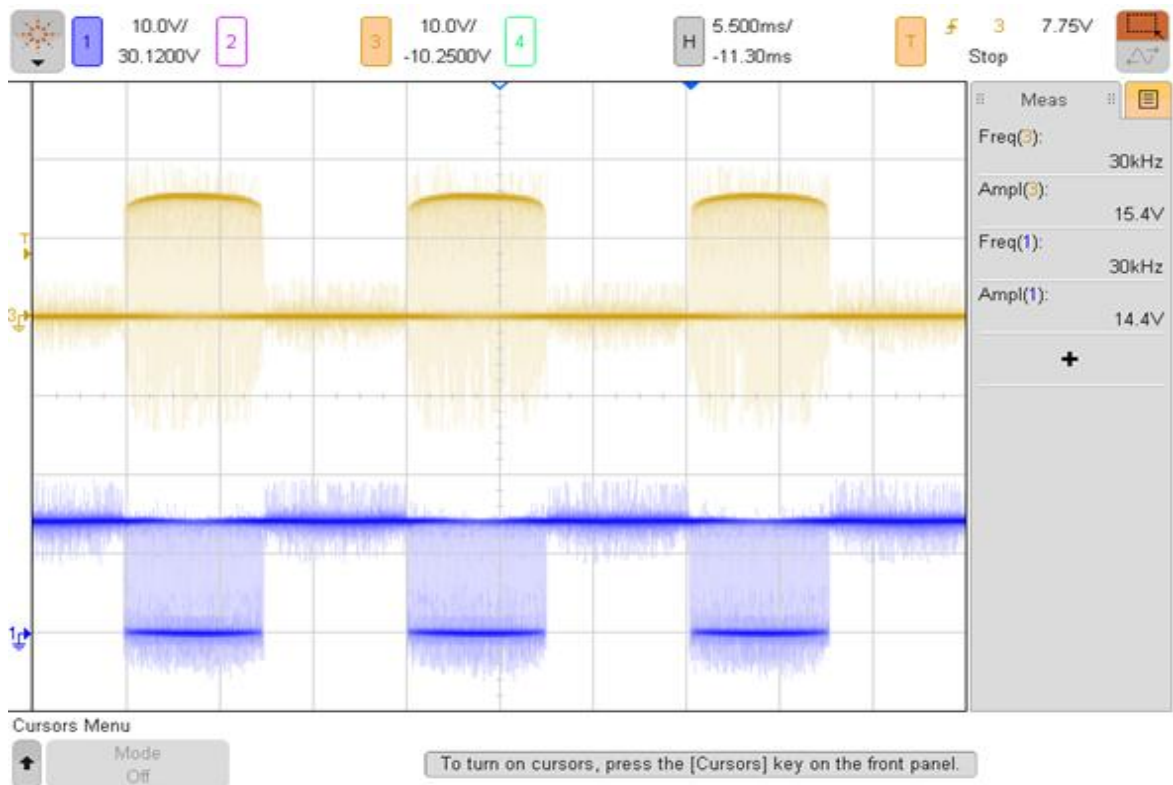


Ilustración 31 Modulación De Puente H. Vgs De Cada Uno De Los Mosfets De Una Rama.

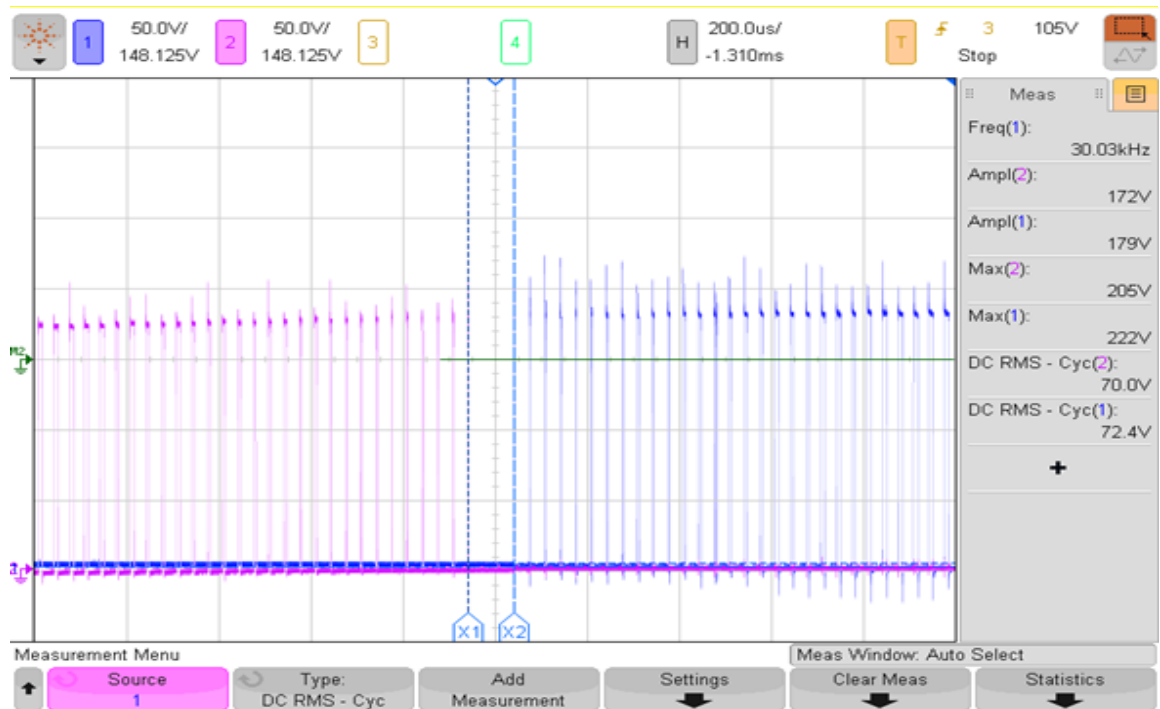


Ilustración 32 Modulación De Puente H De Cada Una De Las Ramas

4.2 RESULTADOS DE LA ELECTROBOMBA EN MODO GENERADOR:

Con el fin de encontrar los mejores resultados de la electrobomba en modo generador se hicieron diferentes pruebas. Inicialmente se ubicó la electrobomba en el sistema hidráulico sin ningún tipo de alimentación eléctrica, a partir de ello se encontró la relación entre la frecuencia mecánica, el caudal y la presión en la entrada (Ver ilustraciones 33 y 34, y los datos en el anexo 11 en la hoja llamada “Caracterización Modo Directo”). Entonces se halló que la velocidad máxima en que podía llegar a girar el rotor del motor es 30 Hz con 30 PSI de presión y 1 l/s de caudal.

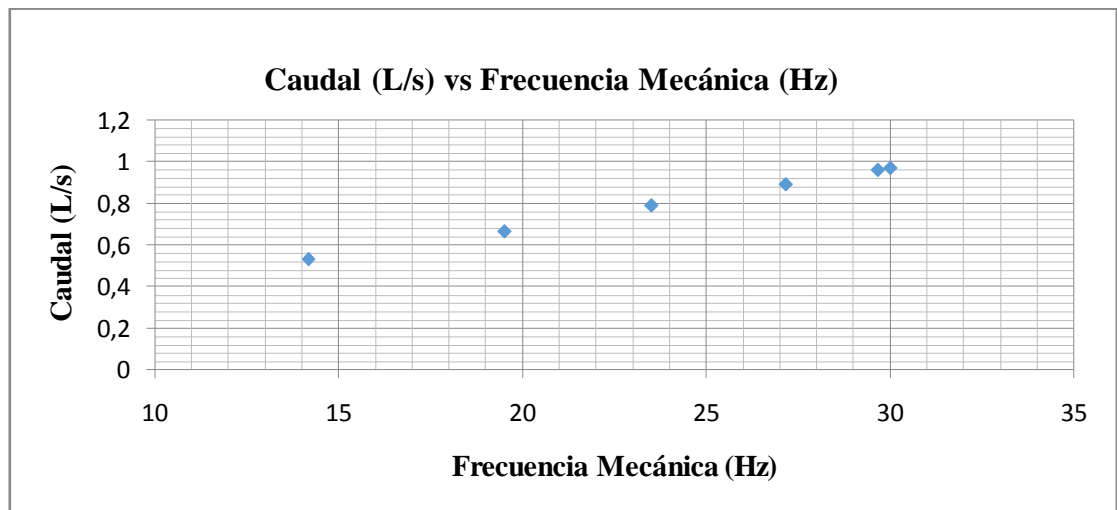


Ilustración 33 Caracterización Modo Directo sin Energizar: Caudal (L/s) vs Frecuencia Mecánica (Hz)

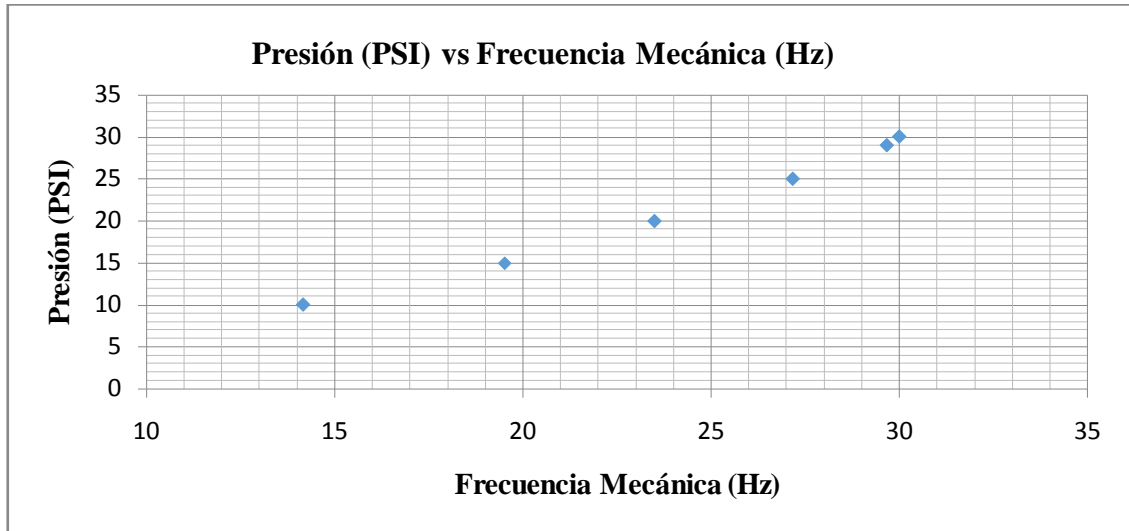


Ilustración 34 Caracterización Modo Directo sin Energizar: Presión (PSI) vs Frecuencia Mecánica (Hz)

Al comparar éstos resultados con los obtenidos en el mismo anexo 11, pero en la hoja llamada “Caracterización Modo Inverso” (ver ilustraciones 35 y 36) se evidenció que el comportamiento de la electrobomba es muy parecido en modo directo al modo inverso, aunque se observó que en modo inverso se podía alcanzar 0,8 Hz más en el punto máximo flujo de la fuente hidráulica, pero se decidió hacer la mayoría de las pruebas en modo directo ya que este es el modo para el que fue construido el convertidor.

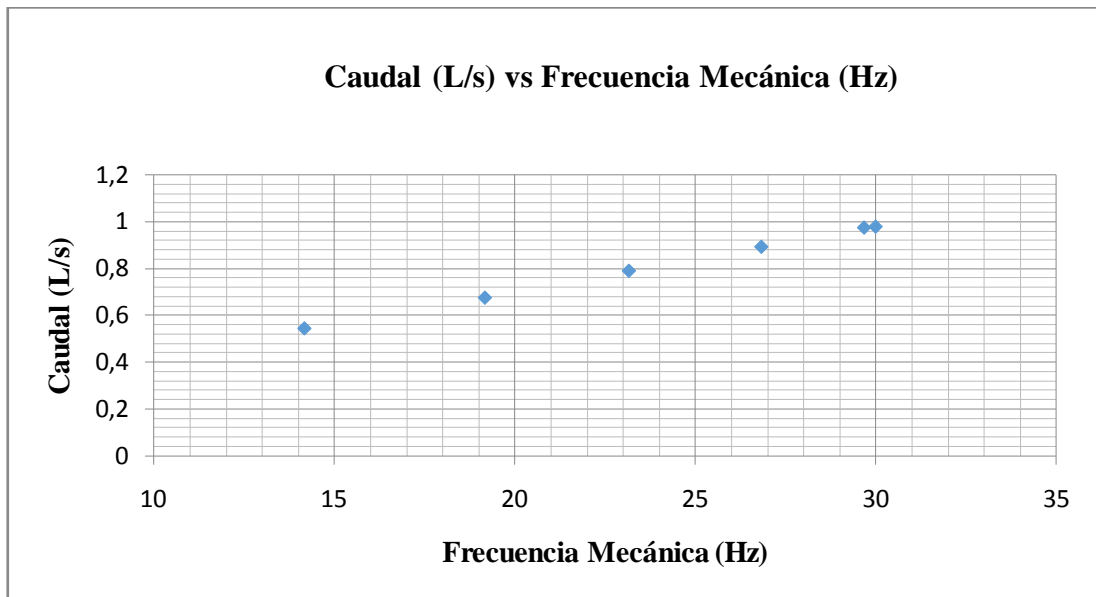


Ilustración 35 Caracterización Modo Inverso sin Energizar: Caudal (L/s) vs Frecuencia Mecánica (Hz)

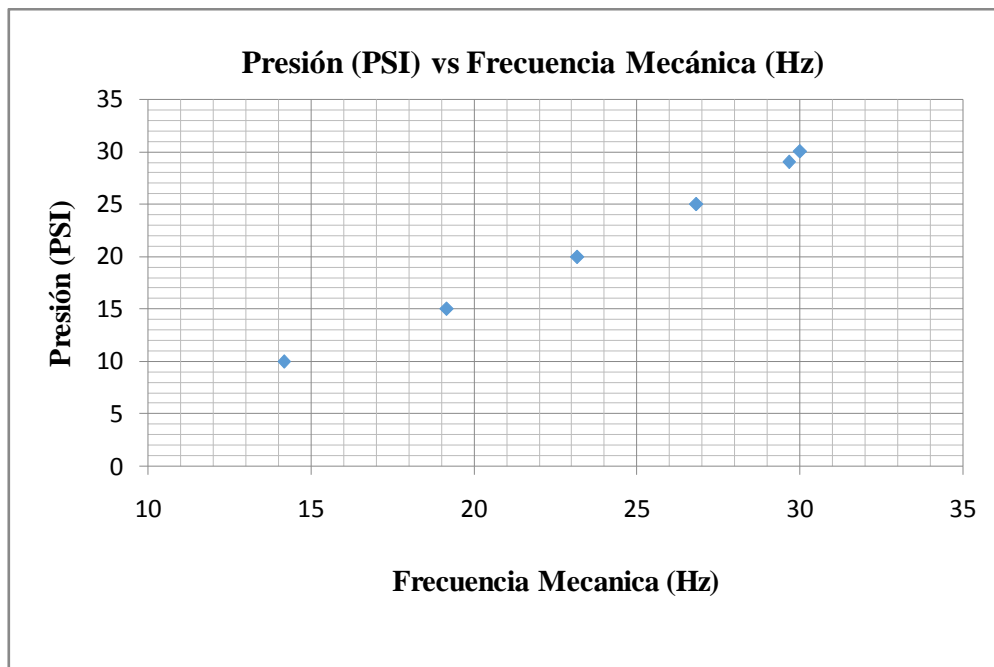


Ilustración 36 Caracterización Modo Inverso sin Energizar: Presión (PSI) vs Frecuencia Mecánica (Hz)

Debido a que la frecuencia mecánica fue menor que la esperada se decidió cambiar las condiciones de prueba en el inversor, su frecuencia fundamental debe ser menor a 30 Hz, y su voltaje debe disminuir, puesto que cambia la impedancia de la inductancia y además la resistencia parasita de la inductancia de entrada de la electrobomba es menor a la resistencia de prueba de laboratorio y le suministraríamos corriente en exceso.

Según lo explicado en la referencia [11] lo ideal es energizar la electrobomba por la inductancia auxiliar para inyectar el flujo magnético que requiere el motor para alcanzar el modo generador y se debe poner como carga una resistencia y un condensador en paralelo a la inductancia principal para evaluar la eficiencia de generación de la máquina, tomando la potencia en el devanado auxiliar como potencia de entrada y la potencia en el devanado principal como potencia de salida. Sin embargo se hicieron unas pruebas (ver en el anexo 11 en la hoja llamada “prueba 5”) donde la potencia eléctrica se inyectaba por el devanado principal y la salida era el devanado auxiliar buscando disminuir pérdidas por conducción debido a que la inductancia principal tiene una resistencia parasita menor a la de la inductancia auxiliar (ver ilustración 10). Para realizar ésta conexión fue necesario disminuir el voltaje de la Boost para que el convertidor entregara menos potencia, pues los devanados se pueden dañar si tienen más corriente que para la que están diseñados. A pesar de esto los resultados no fueron los esperados, se muestran las mismas condiciones en los dos casos (23 Hz, $V_{in}=24V$, ciclo útil =46% $R_o= 40 \Omega$ (resistencia de salida), $C_o=87 \mu F$ (condensador de salida), pero entrando por el auxiliar se llega hasta 37,5% de eficiencia y por el principal se alcanza solo 34,5%. Es necesario recordar que todos los valores de eficiencia mencionados se obtuvieron por medio del osciloscopio a través de la herramienta mencionada al inicio del capítulo.

Se hizo otra prueba variando la resistencia de carga R_o (ver ilustración 37, los datos se encuentran en el anexo 11 en la hoja llamada “prueba 1”) para encontrar donde era el punto de mayor eficiencia de la máquina, teniendo $C_o= 75 \mu F$ de forma constante. Los resultados de esta prueba evidencian que mientras más se disminuye la resistencia es mayor la eficiencia, hasta que llega al

punto máximo y luego tiende a bajar El valor de la resistencia ideal fue de $18,24\Omega$ con una eficiencia de 22,3%.

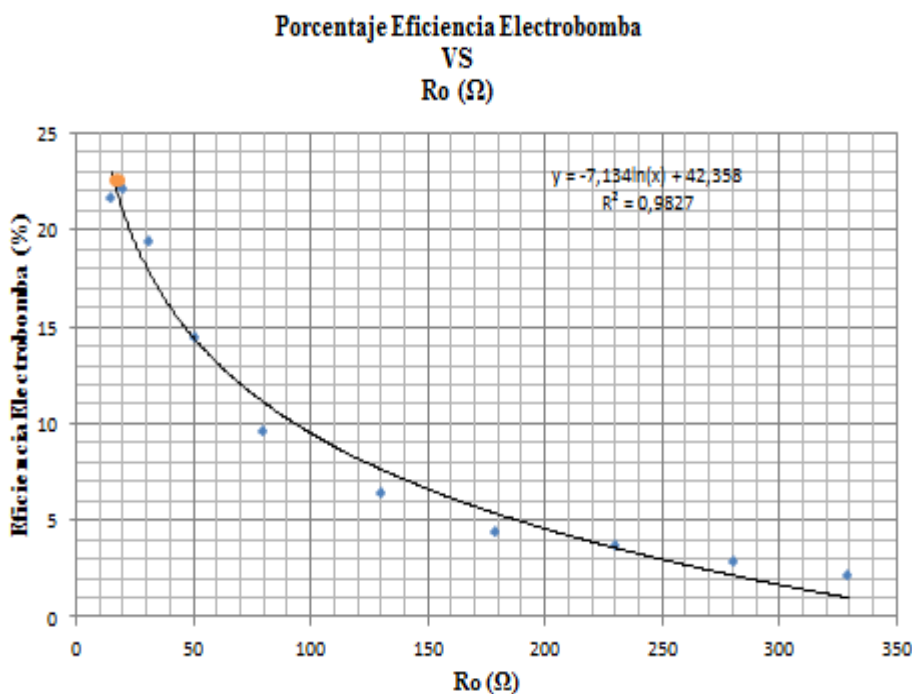


Ilustración 37 Porcentaje de Eficiencia Eléctrica de la Electrobomba vs R_o

Por otro lado, el condensador en paralelo a la carga es muy importante, puesto que el motor requiere que circule potencia reactiva y el condensador ayuda a mantenerla, por eso se quiso realizar una nueva prueba (ver anexo 11 en la hoja llamada “prueba 2”) en la que se mantuvo constante R_o ($18,24\Omega$) y se modificó el valor del condensador de tipo motor-run en paralelo. A partir de ésta prueba se encontró que a medida que aumentaba el valor nominal del condensador había más eficiencia (ver ilustraciones 35 y 36) entonces el condensador quedó determinado como $112\mu\text{F}$ (Valor máximo alcanzado con los condensadores de tipo motor-run disponibles) con una eficiencia de 23,2 %, sin embargo es probable que exista un punto de máxima eficiencia aumentando el valor del condensador.

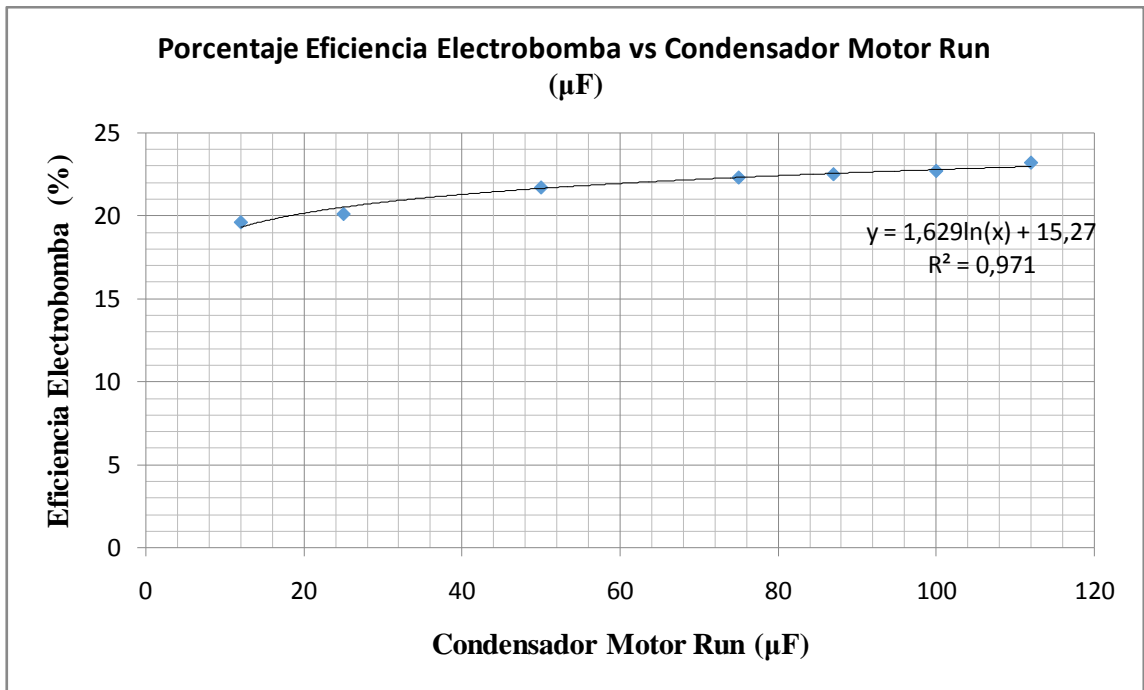


Ilustración 38 Porcentaje de Eficiencia Eléctrica de la Electroboomba vs Co

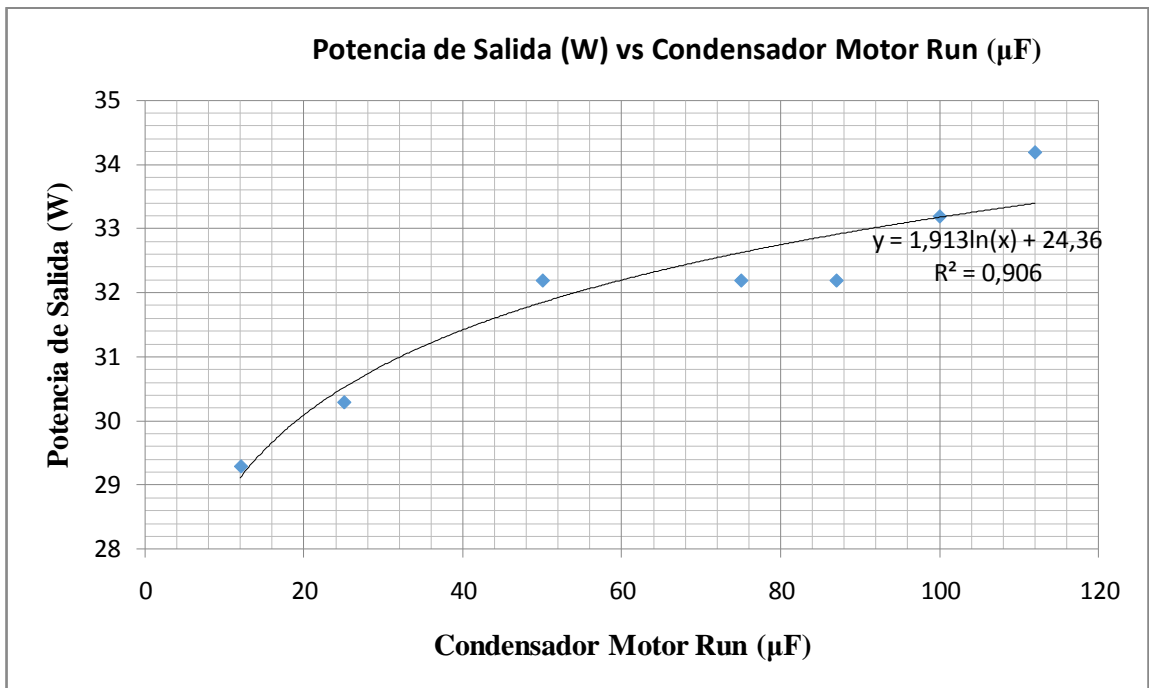


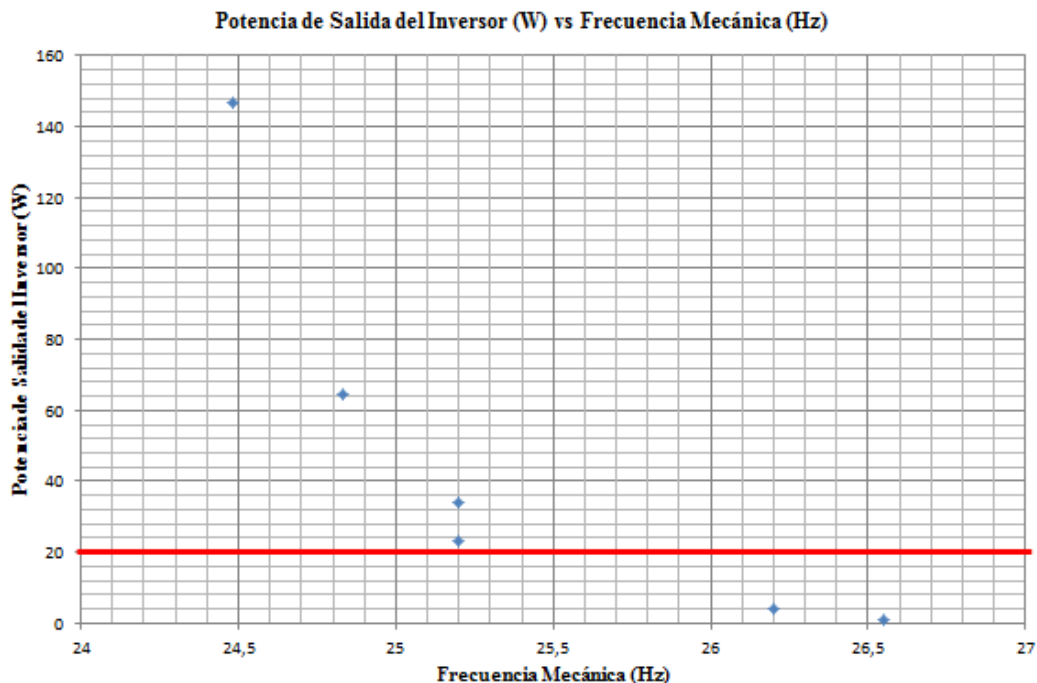
Ilustración 39 Potencia de Salida del Sistema vs Co

En otras pruebas (ver en el anexo 11 en la hoja llamada “prueba 5”) se evaluó el comportamiento del sistema operando a 21 Hz y a 15 Hz (frecuencia fundamental de salida del convertidor), se pudo observar que a 15 Hz las eficiencias eran menores que a 21 Hz, por esto vale decir que trabajado a mayor frecuencia el motor puede tener más eficiencia. Adicionalmente se debe resaltar que el convertidor también mejora su eficiencia al trabajar a mayor frecuencia fundamental y se disminuye el rizado de corriente de la batería.

Volviendo al hecho de que la frecuencia mecánica del Rotor se acerca a la frecuencia eléctrica fundamental de salida del inversor cuando se encendía, se puede mostrar que para potencias mayores a 20 W en la salida del inversor siempre sucedía (ver enilustración 40éste comportamiento manteniendo constante la frecuencia eléctrica en 25 Hz y todos los datos registrados en el esta prueba en el anexo 11 en la hoja llamada “prueba 7”). En latabla 4 se muestra una recopilación de algunas pruebas con diferentes condiciones eléctricas y poniendo en todas el máximo caudal permitido por la fuente hidráulica. En cada una de estasse configuró la frecuencia fundamental del inversor a distintosvalores y se logra apreciar que la frecuencia mecánica sigue a la frecuencia del inversor. La causa de este hecho es porque la potencia hidráulica no es tan grande como para vencer la energía eléctrica que le inyecta el convertidor. Lo anterior explica porque a potencias de salida del convertidor menores a 20 W, el caudal logra empujar a la electrobomba y alcanzar velocidades un poco más altas. Cabe decir que se intentó alimentar con otra fuente hidráulica que proporciona el laboratorio, la cual viene en caída libre desde un tanque que está a 10 m de altura, pero los resultados no fueron satisfactorios porque ésta fuente entrega una menor potencia hidráulica que la suministrada por medio de la electrobomba de 2 HP mencionada en la especificaciones del sistema hidráulico.

Frecuencia de Fundamental (Hz)	Frecuencia Mecánica del Rotor(Hz)
15	15,51667
23	22,65
25	24,7

Tabla 4 Frecuencia Fundamental vs Frecuencia Mecánica del Rotor



Existe un rango de R_o con potencias altas, donde cambiando la resistencia de carga en el devanado principal, se mantiene casi constante la potencia del inversor y la potencia de la carga aumenta, tal como se ve en la ilustración 41 (ésta prueba se hizo entregándole al motor aproximadamente 121 W, ver mayores detalles en el anexo 11 en la hoja llamada “prueba 3”). En la ilustración 42 se muestra como fue el comportamiento de la potencia a cambios de carga observando que se llegó hasta 16,6 W a la salida del sistema, éste comportamiento permite presumir que estos 15,63 W son generados por el inversor, sin embargo éste no es un caso de generación importante ya que la eficiencia de la electrobomba es muy baja (13,6%), es decir hay que entregar 122 W para generar 15,63 W y además no se supera la velocidad de sincronismo. A pesar de que se presume que se están generando 16 W, la potencia hidráulica es constante en todos los casos (ver ilustración 43). En esta prueba también se puede evidenciar que el convertidor es bidireccional, permitiendo que haya un desfase de 5,5 ms ($49,5^\circ$) de la corriente de salida del inversor con respecto al voltaje de salida como se muestra en la ilustración 44, donde la gráfica azul es el voltaje y la morada es la corriente.

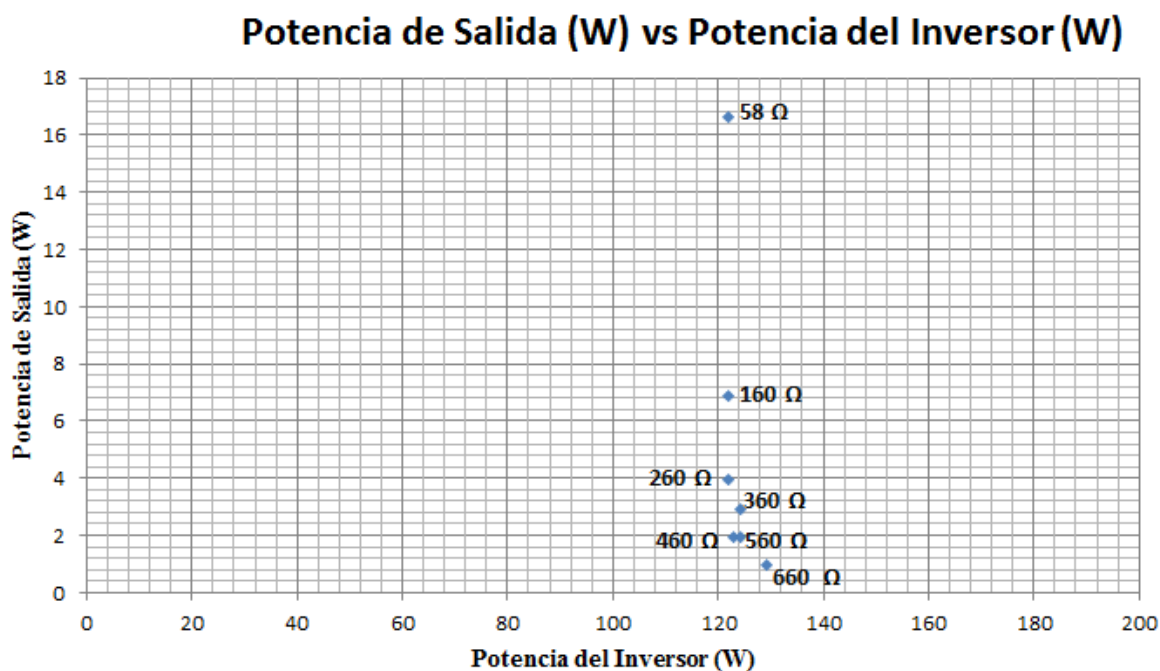


Ilustración 41 Potencia de Salida vs Potencia del Inversor

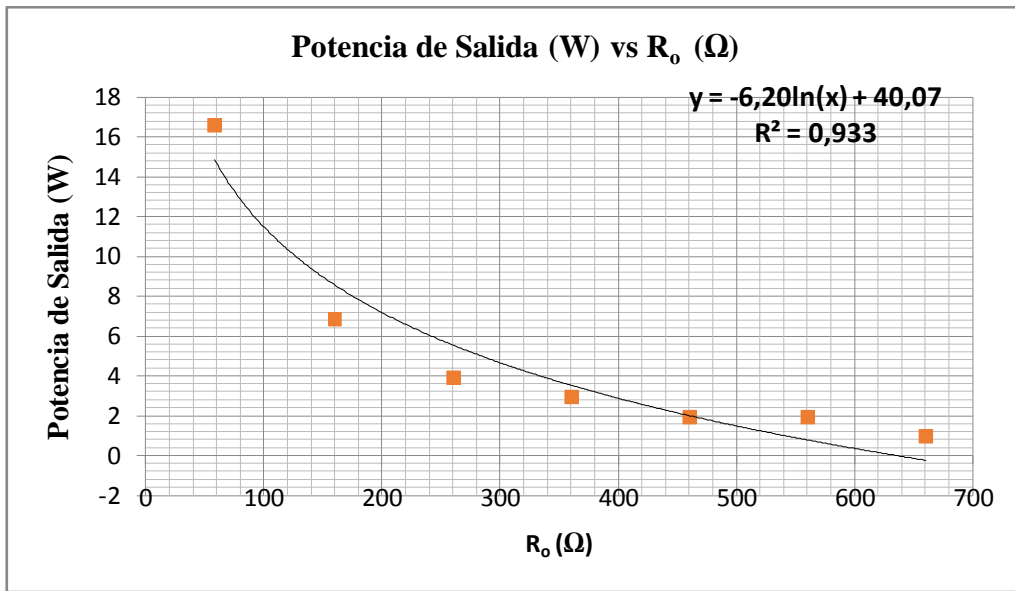


Ilustración 42 Potencia de Salida vs R_o

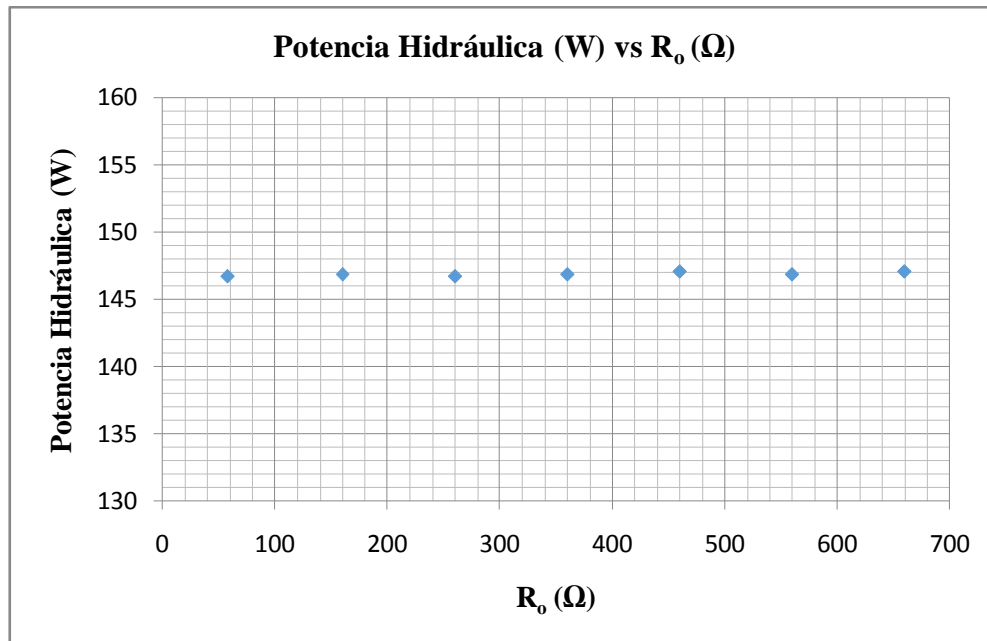


Ilustración 43 Potencia Hidráulica vs R_o

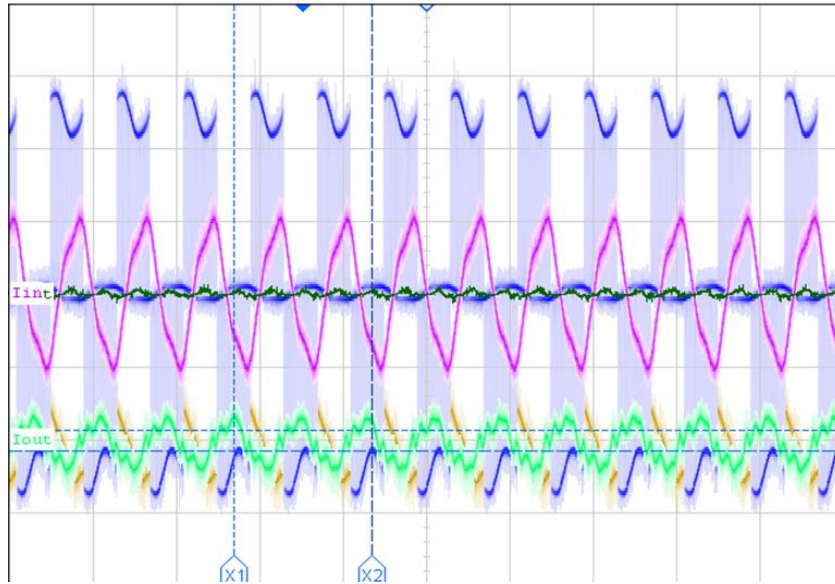


Ilustración 44 Desfase entre Corriente y Voltaje de salida

Se repite la prueba anterior operando la electrobomba en modo de caudal inverso (Ver datos en anexo 11 en la hoja llamada “prueba 6”) con el fin de confirmar que la electrobomba tiene comportamientos parecidos en modo directo y en modo inverso, las condiciones son exactamente las mismas y a partir de los resultados obtenidos se puede llegar a las mismas conclusiones, resaltando que en modo inverso el Rotor alcanza una velocidad mayor. La máxima potencia alcanzada en este caso fue 15,6 W, es decir, 1 W menos que la prueba en directa, esto con una eficiencia de 13% (0,6% menos). Ver ilustración 45. Como se había dicho el comportamiento es muy similar, la potencia hidráulica es constante luego de encender el convertidor (ilustración 46), la máxima potencia alcanzada es más del doble que las otras (ver ilustración 45), y la forma de la ilustración 47 es similar a la ilustración 42.

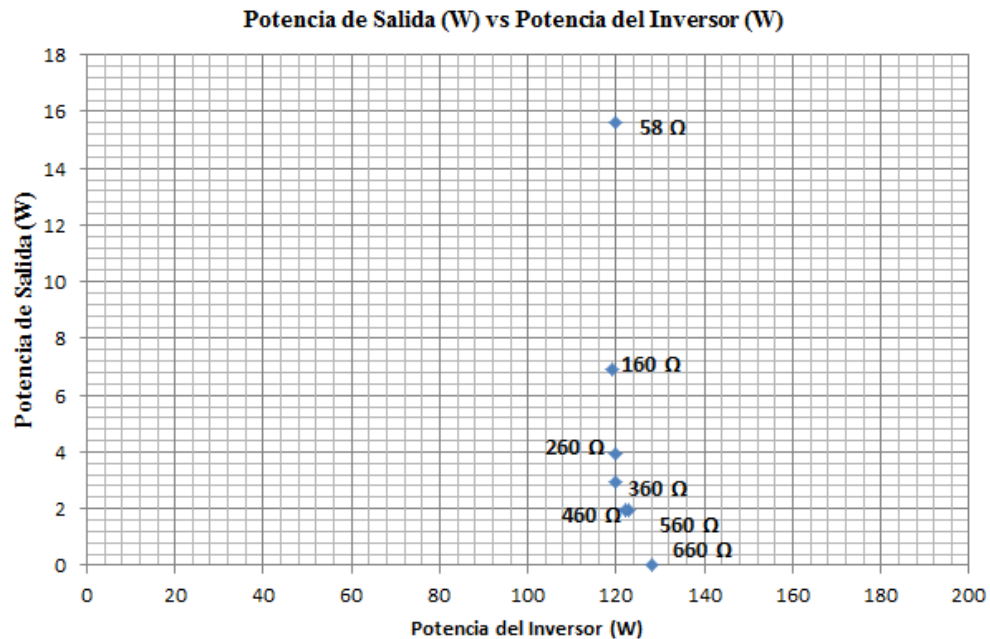


Ilustración 45 Potencia de Salida vs Potencia del Inversor

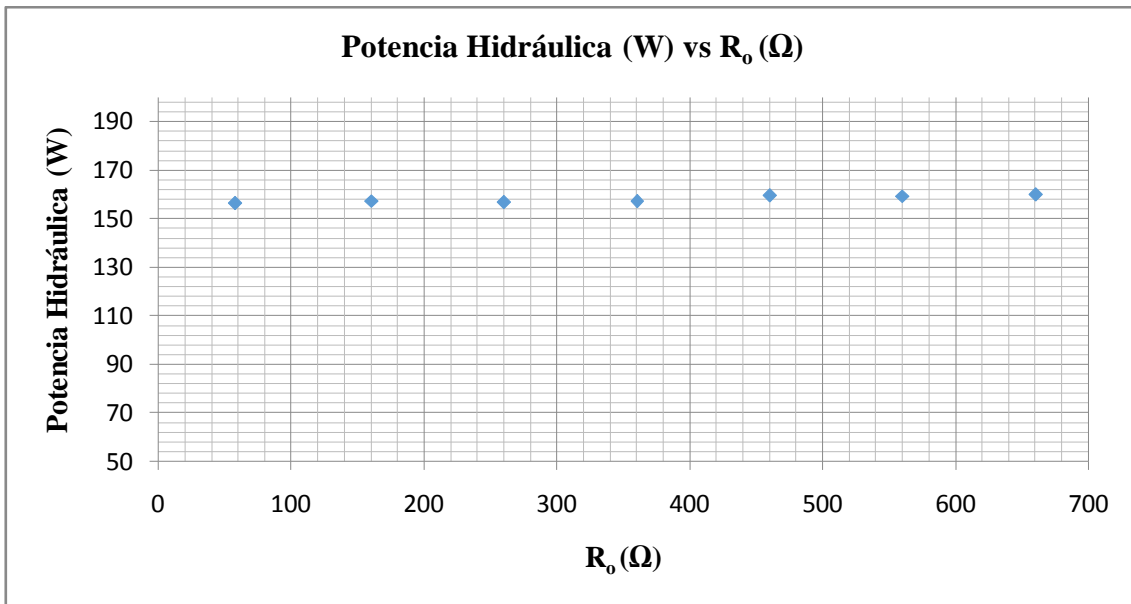


Ilustración 46 Potencia Hidráulica vs R_o

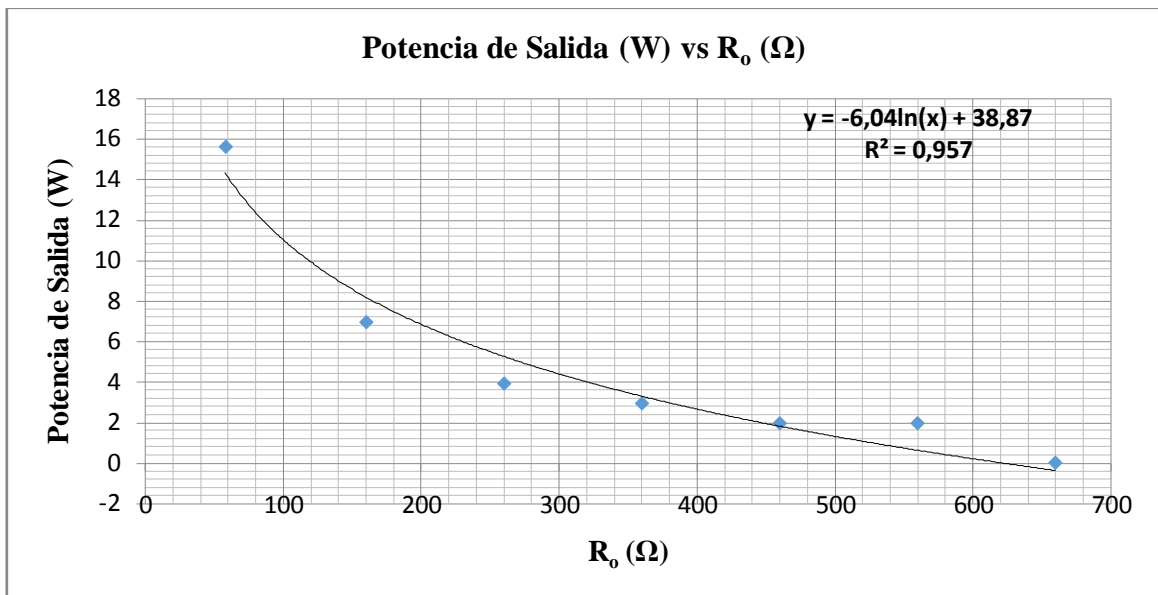


Ilustración 47 Potencia de Salida vs R_o

Para observar el comportamiento de una posible transición de modo motor a modo generador, se operó el sistema con las mejores condiciones encontradas y se empezó a aumentar el caudal desde un punto donde el agua venciera la inercia de la Bomba, (0,51 l/s y 4,9 m.c.a.) hasta el máximo punto de potencia hidráulica que nos entrega la fuente (0,916 l/s y 17,25 m.c.a.). En cada variación se apagaba el convertidor, se configuraba la fuente hidráulica y finalmente se volvía a encender. De esta forma, se creó la ilustración 48 (ver las tablas con los datos en anexo 11 en la hoja llamada “prueba 4”) que evidencia que la velocidad del Rotor es impuesta por el inversor en estas condiciones.

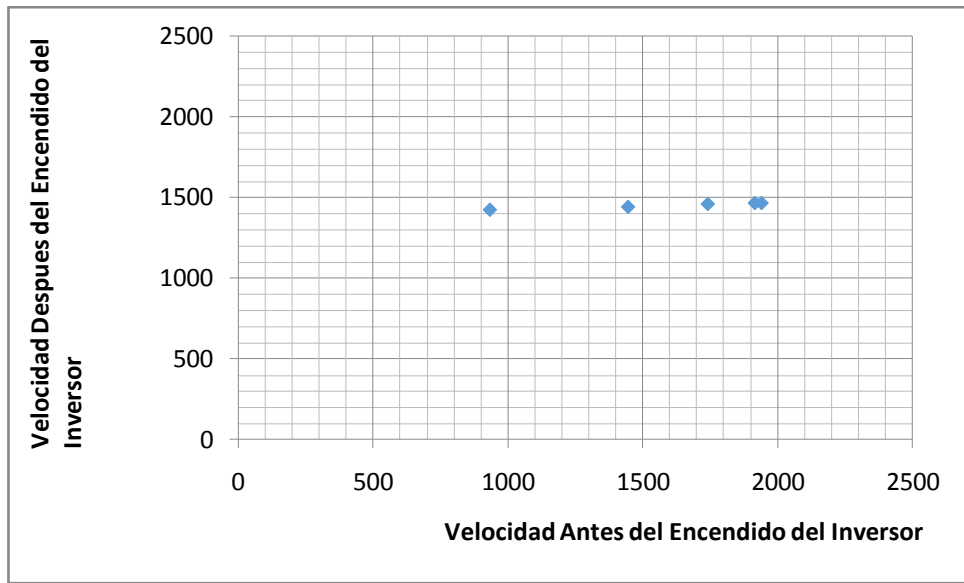


Ilustración 48 Velocidad después del encendido del inversor vs Velocidad antes del encendido del inversor

En la ilustración 49 se muestra que a pesar de que la velocidad del motor no cambia demasiado, la eficiencia del motor sí mejora cuando se aumenta de potencia y en la ilustración 50 podemos ver este aumento de eficiencia con respecto a la velocidad que tiene el motor antes de encender el inversor en cada caso.

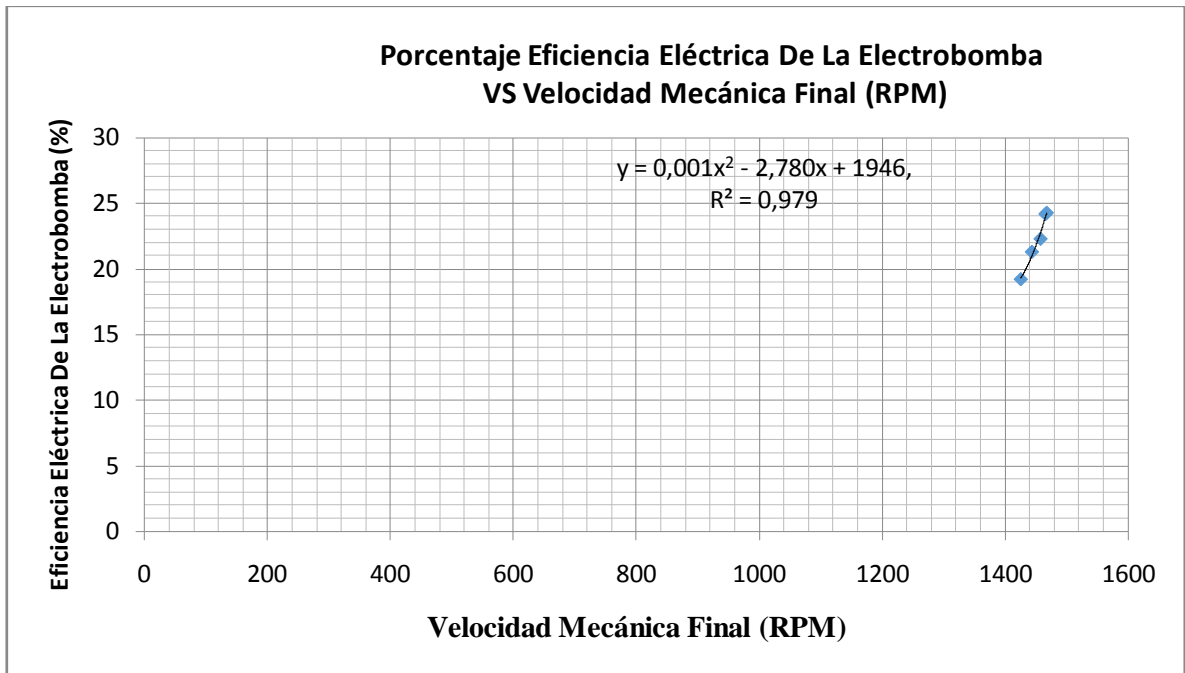


Ilustración 49 Velocidad Mecánica Final (RPM) VS Porcentaje Eficiencia EléctricaElectrobomba

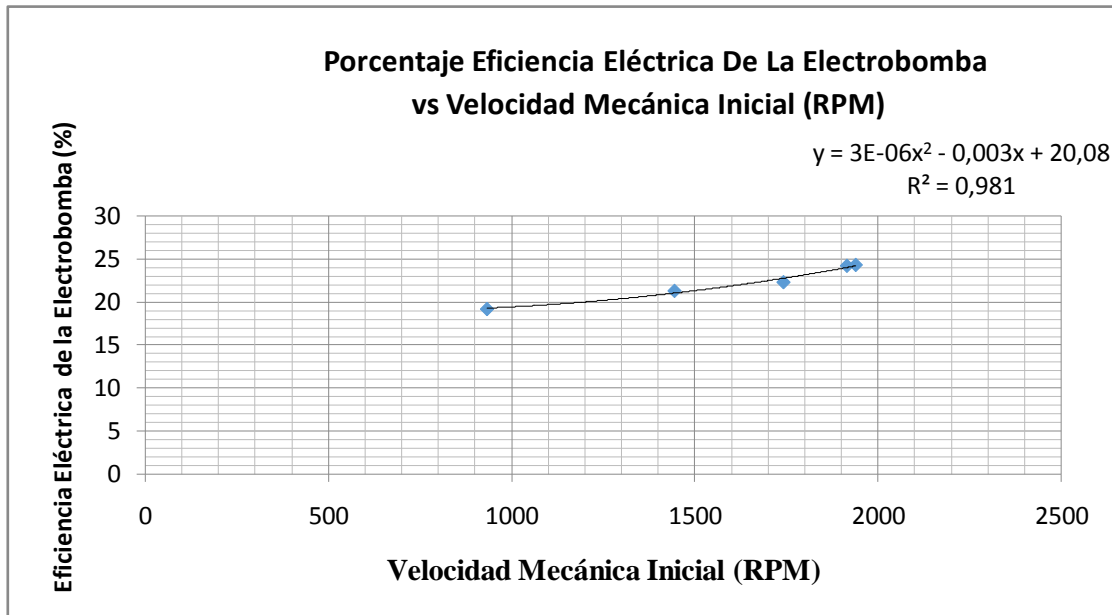


Ilustración 50 Porcentaje Eficiencia Electro bomba vs Velocidad Mecánica Inicial (RPM)

Otra prueba muy significativa, fue estableciendo en 25 Hz la frecuencia fundamental de salida del inversor, $R_o=18,24 \Omega$, $C_o=112 \mu F$, índice de modulación 95% (para evitar una posible distorsión), y variando el voltaje de la Boost (en algunos casos cambiando el voltaje de entrada del circuito de potencia de 48 V a 24 V, ver todos los datos en el anexo 11 en la hoja llamada “prueba 7”). En ésta prueba se encontró que disminuyendo el voltaje RMS de salida que entrega el convertidor, y por consiguiente la potencia que entrega el mismo, va aumentando la eficiencia del motor (ver ilustración 51), una de las razones es porque las pérdidas de conducción en las inductancias en las disminuyen y otra es porque la potencia eléctrica va disminuyendo y permite que la potencia hidráulica la alcance (ver ilustración 52), aumentando la velocidad de Rotación mecánica, y se puede llegar a un punto donde la supere tanto que genera un 200% de eficiencia, en este punto es más probable que el sistema esté en la región de generación puesto que supera en un 6,2% la velocidad de sincronismo, aunque no esté en el punto de mayor torque como generador (ver ilustración 53). En la ilustración 54 se puede hacer un análisis más detallado de la diferencia entre la velocidad mecánica y la frecuencia eléctrica del inversor y como disminuyendo la potencia de salida del convertidor se le permite a la potencia hidráulica poder superar la velocidad de sincronismo y de esta forma permitir que genere.

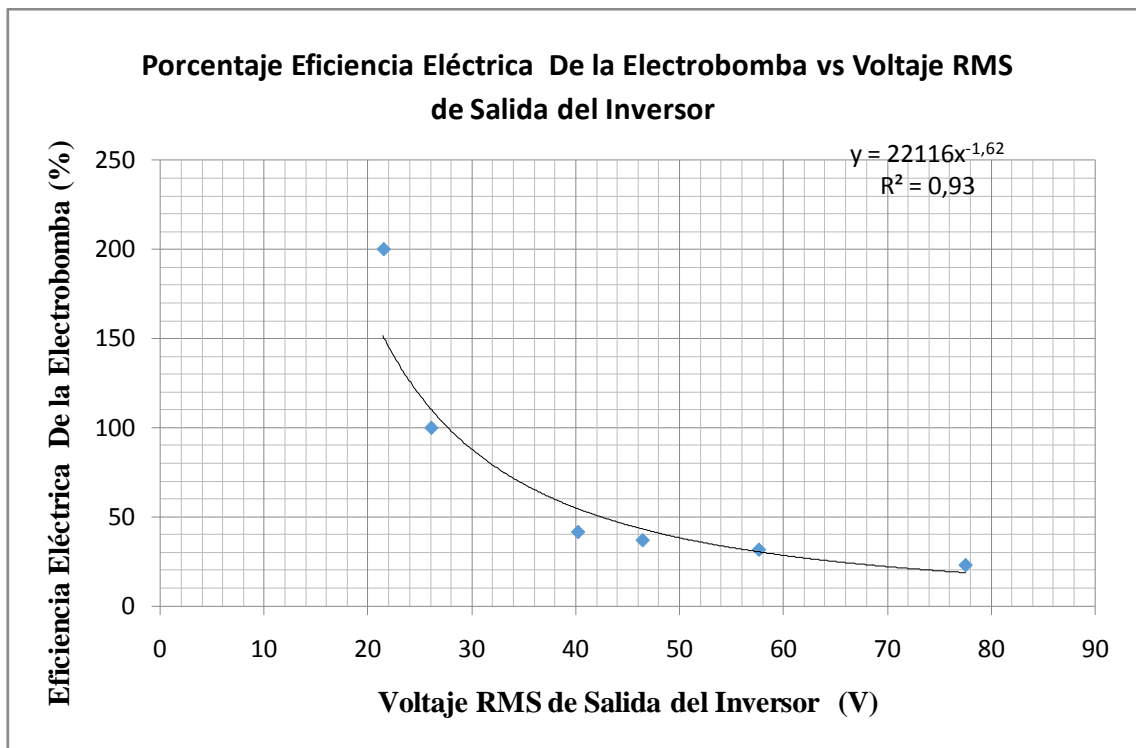


Ilustración 51 Porcentaje Eficiencia Eléctrica De La Electrobomba vs VRMS de Salida del Inversor

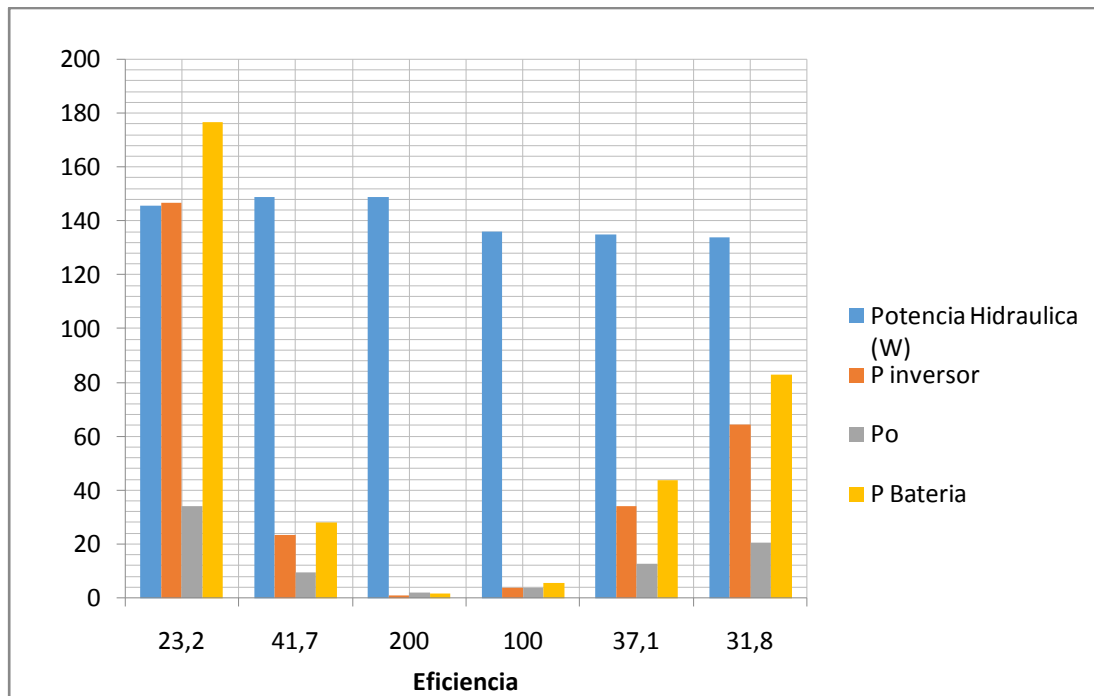


Ilustración 52 Comparación de Potencias En el Caso de Mayor Eficiencia

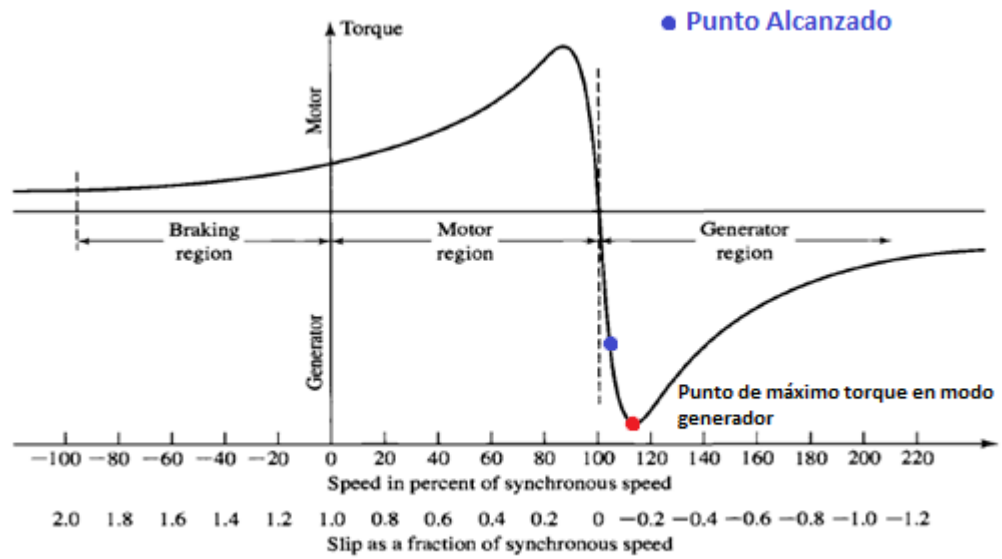


Ilustración 53 Grafica de Torque vs Velocidad en Maquinas de Inducción Mostrando el Punto Alcanzado.⁴

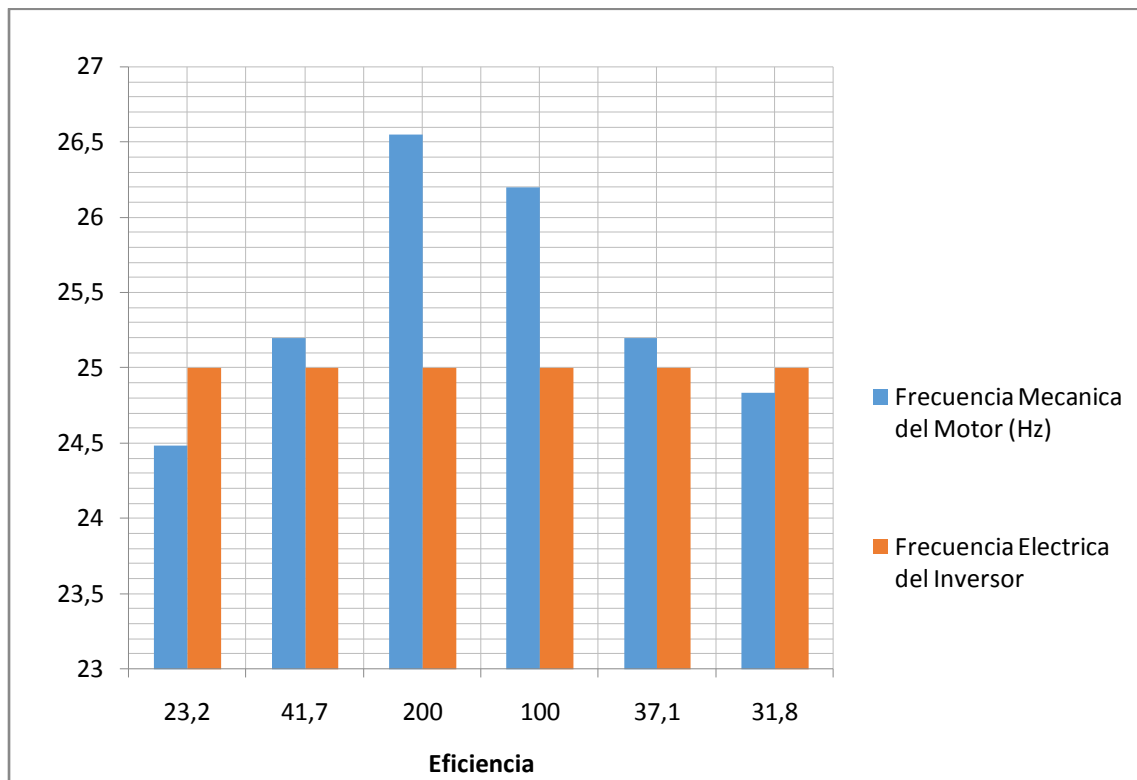


Ilustración 54 Comparación entre la Frecuencia Mecánica del Motor y la eléctrica del Inversor

⁴Ilustración tomada de la referencia [6]

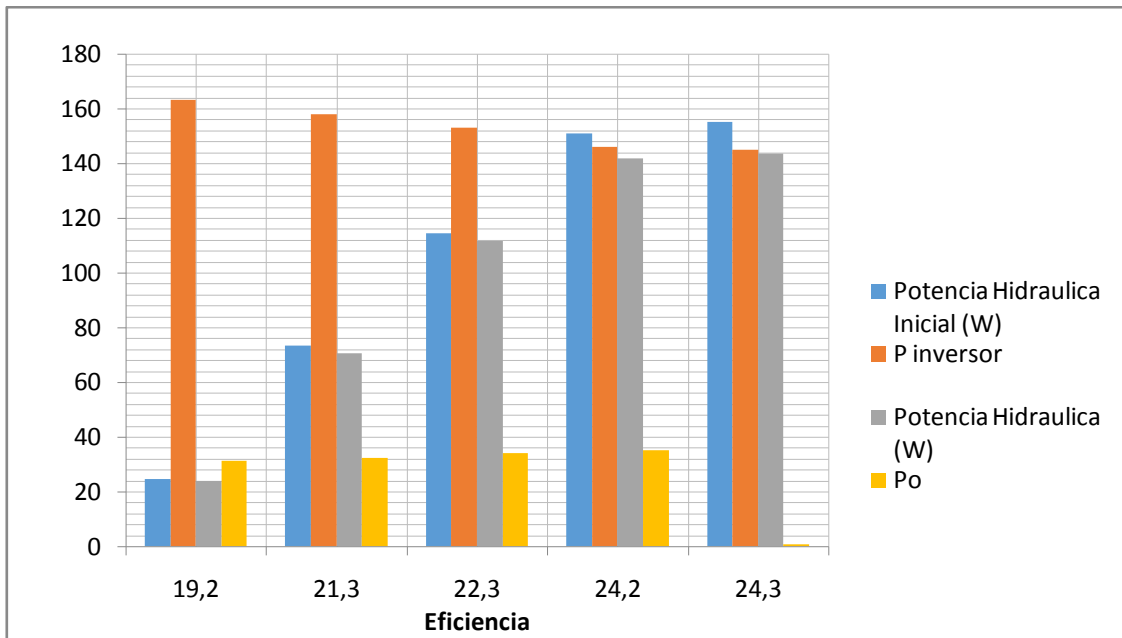


Ilustración 55 Comparación de Potencias

Las ilustraciones 52a55, ésta última tomada a partir de los resultados del anexo 11 en la hoja llamada “prueba 4”, permiten determinar si el sistema se está comportando como generador. A partir de éstas se puede decir que para que en éstos casos para que existiera generación eléctrica la potencia hidráulica debe superar por mucho a la potencia de salida del convertidor, por ejemplo para la eficiencia de 37,1% de la ilustración 52 la potencia hidráulica ya supera por más del triple a la del inversor y aun no se tiene un porcentaje de eficiencia eléctrica de la electrobomba mayor al 100 %, sin embargo ya se nota que se está superando la velocidad de sincronismo pero en un porcentaje muy bajo (ilustración 54). La ilustración 55, que fue tomada de la prueba donde se pretendía, y no se logró, pasar de modo motor a generador incrementando el caudal, se nota que la potencia hidráulica luego de encender el inversor nunca supera la potencia eléctrica de entrada, aunque se haya configurado la fuente para que la potencia hidráulica sea mayor. También se puede decir que en la ilustración 52 en el estado de eficiencia de 23,2%, muestra que el sistema se encuentra en un estado muy parecido a los de la ilustración 55, lo que nos muestra que no se está generando energía en ninguno de los dos casos.

Finalmente se muestra el comportamiento de presión vs caudal en la entrada de la electrobomba (ver ilustración 56), esta gráfica fue generada a partir de pruebas sin excitación eléctrica alguna. En esta ilustración se ubican dos puntos importantes, el punto Rojo es la potencia hidráulica cuando se alcanzó 200% de eficiencia, con baja potencia de salida del inversor y superando la velocidad de sincronismo, es decir, este fue el punto donde se generó, teniendo casi 1W en el inversor y 2 W en la carga. El punto negro muestra la potencia hidráulica en la condición donde la potencia del inversor es constante pero la potencia de la carga aumenta disminuyendo el valor de la resistencia R_o , esto permite presumir que se generó aproximadamente 16 W, sin embargo no se puede asegurar que se está generando, dado que no se supera la velocidad de sincronismo lo que asegura que la máquina aún está en región de motor.

Presión (PSI) vs Caudal (L/s)

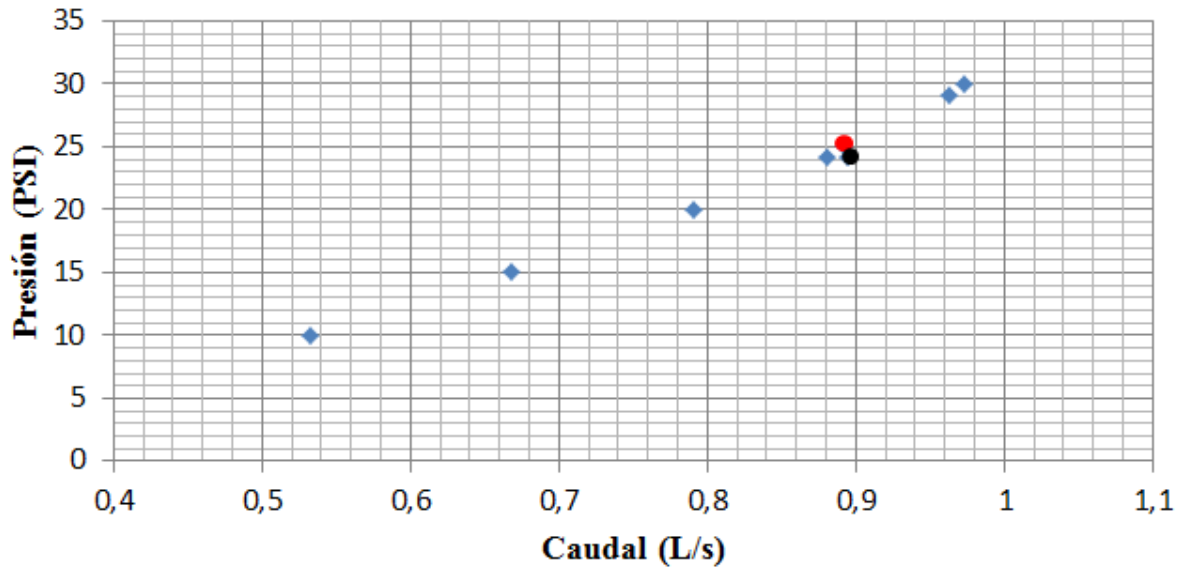


Ilustración 56 Presión (PSI) vs Caudal (l/s)

5. CONCLUSIONES

- Es importante mencionar que se alcanzó un punto de generación, y éste fue el mayor valor de potencia hidráulica con el inversor encendido conectado a la electrobomba Pkm 60 marca Pedrola, el valor fue 149 W, cuando el caudal fue 0,894 L/s (0.000894 m³/s) y la presión 17 m.c.a. (24,163PSI o 166708,51Pa). Es importante mencionar que en ese punto de operación, la potencia de salida del convertidor era de 0,977 W y la de la carga era de 1,99 W, es decir 200% de eficiencia en la máquina Rotativa y superando de ésta manera la velocidad de sincronismo, alcanzando la región de generador. (ver ilustración 56)
- Existe un rango de operación del sistema donde a cambios de carga en el devanado principal, la potencia del inversor es similar en los distintos casos y la potencia en la carga aumenta, en la ilustración 41 y en el anexo 11 en la hoja llamada “prueba 3” se muestra uno de estos rangos, donde se puede ver que el máximo punto de potencia eléctrica en la carga fue 16,6 W, que es más del doble que los otros valores alcanzados con otras cargas resistivas, esto se alcanzó cuando la resistencia y el condensador de salida fueron respectivamente 58 Ω y 112 μ F, , esto permite presumir que se generó aproximadamente 16 W, sin embargo no se puede asegurar que se está generando, dado que no se supera la velocidad de sincronismo lo que asegura que la máquina aún está en región de motor. Para éste punto de operación el caudal fue 0,88 L/s (0.00088 m³/s) y la presión 17 m.c.a. (24,163 PSI o 166708,51 Pa). (ver ilustración 56)
- Se logró diseñar e implementar un convertidor bidireccional capaz de garantizar las condiciones de operación de la tabla 2. Además por medio de programación del microcontrolador el convertidor permite cambiar las frecuencias de conmutación, frecuencia fundamental de salida, ciclo útil de la Boost, índice de modulación del puente H y el tiempo de duración del arranque lento.
- Debido a que el sistema desarrollado y puesto a prueba en el laboratorio de hidráulica de la universidad no generó toda la potencia hidráulica necesaria, no se pudo evaluar de forma contundente el convertidor operando como rectificador. Además tampoco se pudo evaluar a través de otra fuente que emulara la generación como un Variac, debido a que la corriente del inversor no tiene ningún tipo de sincronismo con la corriente suministrada por la red eléctrica. Sin embargo se puede decir que el convertidor soporta que se le exija una corriente con 5,5 ms(49,5°) desfasada con respecto al voltaje.
- El sistema hidráulico desarrollado (Ver anexo 6) permite realizar la conexión de la electrobomba de forma tanto directa como inversa con el fin de suministrar la energía hidráulica a la electrobomba Pkm 60 marca Pedrollo, así como realizar las mediciones de presión y caudal.

- Luego de analizar los diferentes resultados obtenidos del sistema en la sección 4.2, en especial las ilustraciones ilustración 37, ilustración 51, ilustración 52 y la tabla 4 podemos ver que la eficiencia de conversión de energía de la electrobomba depende significativamente de varios parámetros: la carga, la frecuencia fundamental del inversor, la potencia hidráulica y la potencia suministrada por el convertidor. La mayor eficiencia alcanzada de la electrobomba fue el punto de 200 %, resultado de la potencia de salida (en la carga) sobre a potencia que entrega el convertidor, usando la herramienta de eficiencia del osciloscopio MSOX 4034A en este punto se alcanza a superar la velocidad de sincronismo y además es de resaltar que la potencia hidráulica es muchas veces más grande que la eléctrica. Sin embargo debemos tener presente que en ese punto de operación la potencia en la carga era solo de 1,99 W.
- Se considera que la fuente de potencia hidráulica utilizada no fue suficiente, puesto que en ningún momento se logró que la frecuencia mecánica de la electrobomba fue el valor nominal de 60 Hz. Además el punto de mayor eficiencia de la electrobomba(ver ilustración 52) solo se alcanzó cuando la potencia hidráulica fue mucho mayor que la potencia suministrada por el convertidor. Se sugiere para trabajos futuros usar un sistema de prueba con mayor presión, o un tipo de bomba diferente que requiera menor presión.
- Electrobombas como la Pkm 60 permiten trabajar en modo directo o inverso teniendo resultados muy parecidos, con la diferencia que en modo inverso se puede alcanzar una frecuencia mecánica 0,8 Hz más alta. Por otro lado es posible energizar la electrobomba por cualquiera de los dos devanados, con la diferencia que el devanado principal tiene 10 Ω menos, pero en entrando por la inductancia auxiliar se tiene mayor eficiencia.
- Se puede observar en el voltaje de salida (ilustración 20), en el voltaje de la Boost (ilustración 29) e incluso en el voltaje de entrada (ilustración 24) una oscilación de 120Hz, esta es producida por la componente de corriente del doble de la frecuencia fundamental de la modulación del puente H que es exactamente 120 Hz, como se muestra en la ecuación 4. Esta característica hace que nuestro circuito tenga un condensador de 470 μ F en paralelo a la salida de la Boost (para que filtre esta componente de baja frecuencia y la Boost no tenga que soportarla completa, ya que esto dañaría la respuesta de salida de la Boost) y otro condensador en paralelo a la entrada de 48 V para proteger la batería. Entonces se puede aconsejar que si se quiere mejorar la respuesta de convertidor completo de debe mejorar el filtro entre la Boost y el puente H, con esto el rizado de la Boost será más pequeño y la salida del convertidor más estable y además se debe diseñar un filtro LC para proteger la batería y no reducir la vida útil para la que están diseñada.
- El diseño en primera medida se realizó para que la Boost y el puente H conmutarán a 100 kHz, esto hace que los componentes de la Boost puedan ser más pequeño, el rizado de alta frecuencia en la inductancia de la Boost disminuya y las armónicas de alta frecuencia en la modulación estén mucho más alejadas, pero el trabajo a esta frecuencia hace que las pérdidas por conmutación sean muy altas, por lo tanto la eficiencia disminuye en forma considerable y además los componentes pasan a calentarse notablemente lo que hace trabajen cerca a su

límite de temperatura, este fue el motivo por el cual la frecuencia de conmutación de la Boost se bajó a 25 kHz y la del puente H a 30 kHz, esto hizo que mejorará la eficiencia pero aumentó el rizado de la corriente de la batería, lo que hace que se disminuya su tiempo de vida útil, y disminuyeron las muestras a 250 por ciclo de la seno, lo que hace que en caso de que se filtre la señal, ésta va a tener mayor distorsión.

- Es importante continuar con el estudio de este tema dado que obtener una solución energética con este tipo de máquinas, tan comunes y relativamente baratas, sería un gran aporte al desarrollo de las zonas aisladas de la red en el país, por esto se recomienda para trabajos futuros que con el fin de generar mayores potencias eléctricas a partir de la electrobomba se recomienda utilizar una fuente hidráulica que suministre mayor potencia hidráulica con el fin de poder garantizar que se pueda superar la velocidad de sincronismo nominal que es 60 Hz y además alcanzar el máximo punto de torque en modo generador, (Ver ilustración 1).
- En el caso en que se quisiera filtrar la señal de salida del inversor para que el motor sea alimentado con una señal pura de 60Hz, se aconseja usar la modulación unipolar, ya que esta pone la componente de alta frecuencia al doble de la frecuencia a la que conmutan los transistores es decir, para este caso la armónica más alta estaría en 60kHz y no en 30 kHz.
- Es necesario blindar el circuito digital del ruido, debido a que en algunas ocasiones el microcontrolador toma un borde de bajada en la entrada donde se está tomando la señal del pulsador de control y se cambia de estado sin darle ninguna orden.
- Se recomienda realizar el monitoreo del voltaje de salida de la Boost y de los voltajes y corrientes en la entrada y en la salida del convertidor, para garantizar que éste se encuentre operando en un rango seguro, sin importar las variaciones en el sistema hidráulico. Además la medición de algunas de estas variables permitiría realizar el control del convertidor para poder regularlo y que el voltaje RMS no dependa de la carga.
- Con el fin de poder probar el convertidor en el laboratorio con condiciones más similares a las impuestas por la electrobomba se recomienda usar como carga no solo una resistencia, sino una impedancia inductiva que emule su comportamiento (Ver sección 3.2).

BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN

- [1] ENERGREENCOL. Soluciones De Energía Para Áreas Rurales En Colombia [en línea]. Pág. 2. <http://www.energreencol.com/ficheRos_pdf/Energia%20para%20areas%20rurales%20en%20Colombia.pdf> [Citado en 20 de enero de 2014].
- [2] SILVA PÁEZ, PEDRO MANUEL; URREGO BEJARANO, JUAN CARLOS. Estudio Del Mercado Y Potencialidad De La Industria Nacional De Bombas Centrifugas Hidráulicas. Bogotá 1991.
- [3] Estimación Turbina Pelton. [En línea]. <http://antioquia.quebarato.com.co/medellin/turbinas-pelton-para-generar-energia-solo-con-agua_6150BD.html> [Citado en 20 de enero de 2014].
- [4] Estimación Alternador. [En línea]. <<http://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-409537144-alternador-mitsubishi-para-chrysler-dodge-o-jeep-JM>> [Citado en 20 de enero de 2014].
- [5] NIGEL SMITH. Motors As Generators For MicRo-HydRo Power. [En línea]. <http://www.cd3wd.com/cd3wd_40/JF/JF_OTHER/BIG/Motors%20as%20Generators%20-%20N.%20Smith,%20%20ITDG%20UK%201994.pdf> [Citado en 20 de febrero de 2014]
- [6] Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., & Umans, S. D. (n.d.). Electric Machinery. *Sixth Edition*. 2003. p. 324.
- [7] *Ibíd.*, p. 456-457.
- [8] PedRollo.PK Electrobombas Con Rodete Periférico. p. 18. [En línea]. <<http://www.pedRollo.com/dms/Documentazione%20Tecnica/ESP/PK%20-%2060Hz%20ES.pdf>> [citado en 8 de marzo de 2014]
- [9] NIGEL. *Op. cit.*, p. 325.
- [10] Llamas, A., & Senior, T. (2005). Plantas Mini Hidroeléctricas Con Bombas Centrifugas Y Motores De Inducción.
- [11] Ojo, O., Member, S., Omozusi, O., & Member, A. (2000). The Operation of an Inverter-Assisted Single-Phase Induction Generator, *47*(3), 632–640.
- [12] Pedrollo. *Op. cit.*, p. 17.
- [13] Mohan, Ned., Undeland, Tores., Robbins, William. *Electrónica de Potencia: Convertidores, aplicaciones y diseño*. Pág. 190-192. Tercera edición. Mc Graw Hill.
- [14] *Ibíd.*, p. 189.
- [15] VISHAY. IRFP360 Power Mosfet. [En línea]. <<http://www.vishay.com/docs/90292/sihfp360.pdf>> [citado en 24 de septiembre de 2014]
- [16] FERROXCUBE. E80/38/20. p. 2 [En línea]. <<http://www.ferRoxcube.com/FerRoxcubeCorporateReception/datasheet/e803820.pdf>> [citado en 25 de septiembre de 2014]

[17] FERROXCUBE. 3F3. p. 177 [En línea].

<<http://www.ferRoxcube.com/FerRoxcubeCorporateReception/datasheet/3f3.pdf>> [citado en 25 de septiembre de 2014]

[18] WürthElektRonik. CookbookFor Do-It-Yourself Transformer Design.Pág. 13. [En línea].

<https://www.digikey.com/Web%20Export/Supplier%20Content/Wurth_732/PDF/Wurth_CookbookforTranformerDesign.pdf?redirected=1> [citado en 27 de septiembre de 2014]

[19] Erickson, Robert.,Maksimovic, Dragan.Fundamentals of Power ElectRonics. Pág. 542.Terceraedición.Kluwer Academic Publishers.

[20] *Ibíd.*, p. 541.

[21] Karassik, I. J., Messina, J. P., Fraser, W. H., &Karassik, I. J. (n.d.). *PumpHandbook*. Pag.2381