

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**DISEÑO DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA ENSAYO CON  
EQUIPOS DE BOMBEO Y EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA,  
APLICANDO VARIADORES DE FRECUENCIA**

PRESENTADO POR:

**SAMUEL SEBASTIÁN GONZÁLEZ CASTILLO**

**RAFAEL ERNESTO GONZÁLEZ VALLE**

**CÉSAR AMÍLCAR HERNÁNDEZ MARTÍNEZ**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO 2017

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR INTERINO :

**LIC. JOSÉ LUIS ARGUETA ANTILLÓN**

SECRETARIA GENERAL :

**DRA. ANA LETICIA ZAVALA DE AMAYA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

DECANO :

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

SECRETARIO :

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

DIRECTOR :

**ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

Título

:

**DISEÑO DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA ENSAYO CON  
EQUIPOS DE BOMBEO Y EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA,  
APLICANDO VARIADORES DE FRECUENCIA**

Presentado por

:

**SAMUEL SEBASTIÁN GONZÁLEZ CASTILLO**

**RAFAEL ERNESTO GONZÁLEZ VALLE**

**CÉSAR AMÍLCAR HERNÁNDEZ MARTÍNEZ**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor

:

**ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN**

San Salvador, Febrero de 2017

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

**ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN**

## ACTA DE CONSTANCIA DE NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, Jueves 26 de enero de 2017, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 4:00 p.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

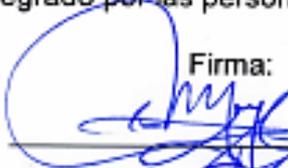
1. Ing. Armando Martínez Calderón  
Director

Firma:   
Firma:   


2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia  
Secretario

Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

- 1- Ing. Armando Martínez Calderón  
(Docente-Asesor)
- 2- MSc. Luis Roberto Chévez Paz
- 3- Ing. José Miguel Hernández

Firma:   
  


Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

DISEÑO DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA ENSAYO CON EQUIPOS DE BOMBEO Y EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA, APLICANDO VARIADORES DE FRECUENCIA

A cargo de los Bachilleres:

- HERNÁNDEZ MARTÍNEZ CESAR AMÍLCAR
- GONZÁLEZ CASTILLO SAMUEL SEBASTIÁN
- GONZÁLEZ VALLE RAFAEL ERNESTO

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 8.8

( ocho punto ocho . )

## AGRADECIMIENTOS

Llegar a este punto no fue sencillo. Muchas personas me ayudaron y los recordaré para siempre. En las siguientes líneas mencionaré únicamente a unos cuantos, y es que, si mencionara a todos, tendría que escribir un tomo especial solo para ello.

A mis padres, Ana Marina Castillo de González y Alex González Chinchilla. Son las dos personas más increíbles que conozco. Han estado a mi lado todo el tiempo y ellos son la principal razón por la que me encuentro en este escenario.

También le agradezco a mi hermano Alex Noé, siempre me ayudó puntualmente en cualquier necesidad que tuve. A mis tíos, Israel y Manuel González, que me apoyaron mucho todo este tiempo. Más que agradecimiento, le dedico este trabajo de graduación a mi hermano Leandro Leonel en su difícil jornada.

De los amigos que conocí en toda la carrera, solamente mencionaré rápidamente a algunos y es que no acabaría si me pusiera a enumerar detalles: Bayron Villarán, Samuel Cornejo, Ruth Alfaro, Nelson Villaherrera, Daniel Flores, Jimmy Herrera, Hernán Gálvez, Javier Alemán, Armando Ramos, Alonso Vásquez, Ignacio Flores, Yuri Cruz, Kevin Argueta, Xochilt Portillo, Santiago Palma y Tony Alvarado. Gracias a todos ustedes.

En 2012, conocí únicamente por un mes a una gran persona. Un mes, una semana, un día o una hora es suficiente para darte cuenta de la grandeza de alguien. En enero de 2013 me enteré que había fallecido. Yo dije en ese momento, que mi tesis iría dedicada a su memoria. Ahora cumplo lo que honré en ese día, me refiero a Emerson Cañas. Compañero olvidado por la mayoría. Una gran persona.

De todos los profesores que tuve en la universidad, de cada uno aprendí algo bueno. Desde los del área básica hasta los especialistas de la escuela de ingeniería eléctrica, pasando por los que nos daban la bienvenida a ese recinto. Empezando por nuestro asesor de tesis y director de la escuela de ingeniería eléctrica, el ingeniero Armando Calderón al cual le estaré eternamente agradecido por habernos dado una oportunidad y creer en nosotros. A los ingenieros Walter Zelaya y Marvin Hernández, a los que considero mis amigos. Al ingeniero Wilber Calderón, que siempre está ayudando a todos los estudiantes de la carrera, gran docente. También al doctor Carlos Martínez, al cual admiro por su dedicación en su trabajo.

Finalmente, y no menos importante, a mis compañeros de tesis Rafael González y Cesar Hernández. De quienes destaco el profesionalismo con el que trabajamos todo el ciclo. Tuvimos diferencias, las cuales nunca estuvieron arriba de nuestro interés colectivo y semana a semana avanzamos sin descansar a pesar de estas. Como recompensa, en un ciclo académico, concluimos nuestra empresa.

A todos, muchas gracias.

**SAMUEL SEBASTIÁN GONZÁLEZ CASTILLO.**

## AGRADECIMIENTOS

Primero quiero darle gracias a Dios por darme fuerza, paciencia y la capacidad de culminar esta etapa de mi vida, logro que no hubiera sido posible sin el sacrificio y apoyo incondicional de mi padre Rafael Antonio González, de mis abuelos Francisco González Díaz (QEPD) y Eva Romero (QEPD), de mis hermanos Francisco y Alba, de mis primos Wendy, Rene, Gustavo y José, de mis tíos Alcides, Alfredo, Evelin, Mario, Vinicio y mi querido tío Bladimir (QEPD), a todos ellos les doy un agradecimiento especial por haberme ayudado en muchos tramos de mi carrera, por ser siempre los seres que me dan fuerza para seguir adelante, siendo una persona de bien y honesta, les estoy infinitamente agradecido.

También quiero dar gracias a todos mis compañeros de carrera con los que compartí momentos inolvidables que quedaran en mi memoria, a todos esos compañeros de lucha, de estudio, de desvelos, de alegrías y tristezas, muchas gracias.

A todos los docentes de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador que me brindaron sus conocimientos y experiencias, tratando de la mejor manera de formar en cada uno de los estudiantes verdaderos Ingenieros Electricistas y personas con principios éticos laborales, muchísimas gracias.

Agradecimientos para mis compañeros de trabajo que en los últimos años siempre me brindaron su apoyo, su ayuda y su amistad, haciendo que el ambiente laboral sea gratificante y no una carga para cumplir mis metas académicas.

A mis compañeros de tesis, Samuel y Cesar, con quienes trabajamos duro semana tras semana compartiendo nuestras experiencias y conocimientos, aguantándonos las diferencias con respeto, pero sobre todo manteniendo la unión y la meta siempre fija en la responsabilidad de realizar un buen trabajo y de no parar hasta terminar, solo puedo estarles agradecido de haber formado un buen equipo de trabajo.

Agradezco a nuestro asesor de tesis, Ing. Armando Martínez Calderón, por su tiempo semana tras semana, por sus consejos, por su orientación y por sus experiencias que nos sirvieron grandemente para realizar una buena investigación.

Finalmente le agradezco a todas las personas que me aprecian y me apoyan de alguna manera, a los que me quieren, a los que les alegra mi triunfo, a los que confiaron en mí y a los que no, muchas gracias.

**RAFAEL ERNESTO GONZÁLEZ VALLE.**

## AGRADECIMIENTOS

Dios nos premia con la vida y por cada día le doy gracias, hoy especialmente lo hago además de ese regalo que me da, por permitirme alcanzar la meta de realizarme en mis estudios como un profesional, después de recorrer un largo trayecto el cual ha estado lleno de muchas dudas, dificultades alegría y satisfacciones, hoy, la más grande de todas ha sido esta, la de terminar mi trabajo de graduación para por fin obtener el título académico de ingeniero.

Después de Dios le doy gracias a mis padres, Carmen Martínez y Cesar Hernández, que han confiado en mí a pesar del tiempo, a mi mamá, gracias por toda la compañía brindada en las noches de desvelo por el estudio y por estar pendiente para despertarme en las madrugadas para poder llegar a mis clases, a mi papá que ha sido mi apoyo y sostén durante todo este tiempo por sus consejos y su fe en mí y por todas esas ocasiones en las que su interés me ayudo a darme fuerza y no renunciar mi metas, por ellos pude seguir adelante y ahora les doy gracias y les dedico este trabajo. También agradezco a mi hermana que estuvo pendiente de más de una forma y me alentó a no detenerme, gracias por todo su apoyo emocional y hasta económico que me brindó.

Ahora también quiero darle gracias a Karla Guadalupe Aguirre, madre de mi hija Ximena Abigail, por todo su apoyo en estos últimos años de mi carrera en los que tuvo la paciencia de aguantarme y esperarme, por su tiempo por el apoyo incondicional y consejos brindados.

Durante todo este tiempo he conocido personas algunas de las cuales con mucho orgullo puedo decir que se convirtieron en mis compañeros y posteriormente en verdaderos amigos, al transcurrir del tiempo fueron con quienes terminamos apoyándonos de diversas formas con tal de cumplir nuestra meta, algunos lo han logrado ya, mientras que otros estamos a punto de hacerlo, gracias a Carlos Aguilar, Santiago Palma, Luis Peñate, Patriz Rafael, Marvin Cerén y algunos más que no menciono pero que son igual de importantes ya que de igual forma compartimos risas y sufrimientos pero ahora toca compartir un triunfo.

Doy las gracias a nuestro asesor de tesis Ing. Armando Calderón el cual tuvo la amabilidad de guiarnos por el camino correcto durante el tiempo que duro nuestra investigación dándonos consejos y facilitando nuestro camino con su conocimiento.

También doy gracias a todos los docentes de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de los cuales obtuvimos el conocimiento necesario para poder culminar la carrera, cada uno tuvo su dificultad, unos mucho más que otros, pero a todas gracias.

A Juan y señor Posada laboratoristas de la EIE porque más de una vez nos facilitaron lo que necesitamos además de compartir un rato de experiencias y momentos amenos, todos los administrativos especialmente a Reina Vides nuestra secretaria que está activa de trabajar por facilitarnos nuestros tramites y compartir un momento agradable.

A mis compañeros de tesis Samuel González y Rafael González que estuvieron este tiempo haciendo hasta lo imposible, por todo ese esfuerzo gracias.

Al final un agradecimiento a todos los que me brindaron su apoyo de una u otra forma, por los que alguna vez me pusieron en oración o me dieron un consejo.

**CÉSAR AMÍLCAR HERNÁNDEZ MARTÍNEZ.**

# Contenido

|   |    |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN .....  | 1  |
| OBJETIVOS .....   | 2  |
| OBJETIVO GENERAL .....  | 2  |
| OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....   | 2  |
| ALCANCES .....  | 3  |
| CAPITULO I .....  | 4  |
| 1    MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO .....  | 4  |
| 1.1    ANÁLISIS DE CIRCUITO EQUIVALENTE DE MOTOR DE INDUCCIÓN .....         | 4  |
| 1.2    PAR DE ARRANQUE .....  | 6  |
| 1.3    CARGA DEL MOTOR .....  | 7  |
| 1.4    TIPO DE AISLAMIENTO, INVERTER DUTY MOTOR .....                       | 8  |
| 1.4.1    ENCLAUSTRAMIENTO .....   | 8  |
| 1.5    MOTORES DE EJE HUECO .....   | 9  |
| 2    ARMÓNICOS .....  | 9  |
| 2.1    ANÁLISIS DE ARMÓNICOS EN LOS MOTORES DE INDUCCIÓN .....              | 9  |
| 2.2    EFECTOS POR DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LOS MOTORES .....                 | 12 |
| 2.2.1    PÉRDIDAS $I^2R$ .....  | 14 |
| 2.2.2    CORRIENTE DE FOUCAULT O CORRIENTES EDDY .....                      | 14 |
| 2.2.3    PÉRDIDAS POR CORRIENTES DE EDDY .....                              | 14 |
| 2.2.4    EFECTO PIEL .....  | 16 |
| 2.3    ARMONICOS EN MOTORES DE INDUCCIÓN .....                              | 17 |
| 2.4    LÍMITES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN SISTEMAS DE ENERGÍA .....          | 18 |
| 2.5    CRITERIOS DE SELECCIÓN DE MOTORES .....                              | 19 |
| 3    BOMBAS CENTRIFUGAS .....   | 20 |
| 3.1    BOMBA VERTICAL .....   | 20 |
| 3.1.1    CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS VERTICALES .....                     | 20 |
| 3.1.2    VENTAJAS QUE OFRECEN LAS BOMBAS VERTICALES .....                   | 20 |
| 3.2    POTENCIA REQUERIDA POR LA BOMBA Y EL MOTOR .....                     | 20 |
| 3.2.1    EFICIENCIA DE LA BOMBA .....                                       | 21 |
| 3.3    CARGA DEL SISTEMA. ....  | 21 |
| 3.3.1    CARGA ESTÁTICA. ....   | 22 |
| 3.3.2    CARGA NETA DE SUCCIÓN POSITIVA .....                               | 23 |
| 3.4    PÉRDIDAS DE CARGA EN EL SISTEMA .....                                | 23 |
| 3.4.1    PERDIDAS EN LA ENTRADA Y SALIDA. ....                              | 25 |
| 3.4.2    CURVAS DE FRICCIÓN Y DE CARGA DEL SISTEMA. ....                    | 25 |
| 3.4.3    LA PÉRDIDA DE CARGA DEBIDO A ACCESORIOS, PERDIDAS SECUNDARIAS..... | 25 |
| 3.5    DETERMINACIÓN DEL DIÁMETRO EN LA TUBERÍA .....                       | 26 |
| 3.5.1    TRAMO DE SUCCIÓN .....   | 27 |
| 3.5.2    TRAMO DE IMPULSIÓN .....   | 27 |

|                 |   |    |
|-----------------|---|----|
| 3.6             | VARIACIONES EN EL FLUJO DESEADO .....   | 27 |
| 3.7             | RECORTE DE IMPULSOR .....   | 28 |
| 3.8             | EFICIENCIA DETERMINADA A PARTIR DE LA CURVA DE LA BOMBA .....                           | 28 |
| 3.9             | EXPLICACIÓN DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS.....                            | 29 |
| 3.9.1           | USO DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE<br>FUNCIONAMIENTO..... | 31 |
| 3.10            | LEYES DE AFINIDAD .....   | 31 |
| 3.11            | CABEZAL DE DESCARGA.....  | 33 |
| 3.11.1          | DISEÑO DEL CABEZAL PARA LAS BOMBAS VERTICALES. ....                                     | 33 |
| 4               | ARRANCADORES PROGRESIVOS.....   | 33 |
| 4.1             | PRINCIPALES TIPOS DE VARIADORES DE VELOCIDAD .....                                      | 34 |
| 4.1.1           | RECTIFICADOR CONTROLADO .....   | 34 |
| 4.1.2           | CONVERTIDOR DE FRECUENCIA .....   | 34 |
| 4.1.3           | REGULADOR DE TENSIÓN.....   | 34 |
| 4.1.4           | VARIADORES PARA MOTORES DE CC .....   | 34 |
| 5               | VARIADORES DE FRECUENCIA.....   | 35 |
| 5.1             | DESCRIPCIÓN DE UN VFD .....   | 35 |
| 5.1.1           | SEÑAL PWM.....  | 36 |
| 5.2             | USO DE VFD'S .....  | 36 |
| 5.2.1           | FUNCIONES DE LOS VARIADORES DE VELOCIDAD. ....  | 36 |
| 5.2.2           | VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS VARIADORES DE VELOCIDAD.....                              | 37 |
| 5.2.3           | VFD COMO ARRANCADOR .....   | 37 |
| 5.3             | PARAMETROS DE SELECCIÓN DE VFD .....  | 38 |
| 6               | SENSORES DE PRESION.....  | 38 |
| 6.1             | SENSORES DE PRESIÓN, SEÑAL DE CORRIENTE Y VOLTAJE .....                                 | 39 |
| CAPÍTULO 2..... |   | 40 |
| 1               | FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA ENERGIA SOLAR. ....  | 40 |
| 1.1             | ENERGIA SOLAR.....  | 40 |
| 1.2             | EL SOL. ....  | 41 |
| 1.3             | LA TIERRA. ....   | 42 |
| 1.4             | MOVIMIENTOS DE LA TIERRA.....   | 43 |
| 1.4.1           | EL MOVIMIENTO DE TRASLACIÓN: EL AÑO.....  | 43 |
| 1.4.2           | EL MOVIMIENTO DE ROTACIÓN: EL DÍA.....  | 43 |
| 1.4.3           | EL MOVIMIENTO DE PRECESIÓN. ....  | 44 |
| 1.4.4           | EL MOVIMIENTO NUTACIÓN. ....  | 44 |
| 1.4.5           | BAMBOLEO DE CHANDLER. ....  | 45 |
| 1.5             | LA ECLÍPTICA.....   | 45 |
| 1.5.1           | DECLINACIÓN SOLAR.....  | 46 |
| 1.5.2           | COORDENADAS SOLARES .....   | 46 |
| 1.6             | RADIACIÓN SOLAR.....  | 47 |

|                 |  |    |
|-----------------|--|----|
| 1.6.1           | TIPOS DE RADIACIONES.....                              | 47 |
| 1.6.2           | IRRADIACIÓN E IRRADIANCIA SOLAR. ....                  | 48 |
| 1.6.3           | HORA SOL PICO. ....                                    | 48 |
| 1.7             | EFFECTO FOTOVOLTAICO.....                              | 49 |
| 1.8             | CELULA SOLAR FOTOVOLTAICA.....                         | 49 |
| 1.8.1           | EL VATIO PICO. ....                                    | 50 |
| 1.8.2           | TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS.....                    | 50 |
| 1.8.2.1         | CÉLULA MONO-COMPONENTE. ....                           | 50 |
| 1.8.2.2         | CÉLULA POLI-COMPONENTE. ....                           | 51 |
| 1.8.2.3         | MEZCLAS POLIMÉRICAS.....                               | 51 |
| 1.9             | SISTEMAS FOTOVOLTAICOS. ....                           | 51 |
| 1.9.1           | TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....                   | 52 |
| 1.9.1.1         | SISTEMAS AISLADOS.....                                 | 52 |
| 1.9.1.2         | SISTEMAS CONECTADOS A LA RED.....                      | 52 |
| 1.9.1.3         | SISTEMAS HÍBRIDOS. ....                                | 52 |
| 1.9.2           | COMPONENTES BÁSICOS DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS..... | 53 |
| CAPÍTULO 3..... |  | 54 |
| 1               | SELECCIÓN DE BOMBA.....                                | 54 |
| 1.10            | CURVA DE LA BOMBA SELECCIONADA.....                    | 54 |
| 1.11            | CALCULO DE LOS HP.....                                 | 54 |
| 1.12            | DIMENSIONAMIENTO DE LA BOMBA .....                     | 55 |
| 2               | SELECCIÓN DE MOTOR.....                                | 55 |
| 2.1             | PROPUESTA DE DIFERENTES TIPOS DE MOTOR .....           | 56 |
| 2.1.1           | PROPUESTA ESPECIFICA DE MOTOR .....                    | 56 |
| 3               | SELECCIÓN DE VFD .....                                 | 57 |
| 3.1             | CRITERIOS TOMADOS EN CUENTA PARA LA SELECCION.....     | 57 |
| 3.2             | PROPUESTA DE DIFERENTES TIPOS DE VARIADORES.....       | 58 |
| 3.1.1           | PROPUESTA DE VARIADOR DE FRECUENCIA.....               | 58 |
| 4               | SELECCION DE SENSOR DE PRESIÓN .....                   | 59 |
| 5               | DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO.....         | 59 |
| 5.1             | INTRODUCCIÓN.....                                      | 59 |
| 5.2             | COMPOSICIÓN DEL SISTEMA HÍBRIDO.....                   | 60 |
| 5.3             | METODOLOGÍA DEL DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA. ....     | 60 |
| 5.3.1           | ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA.....                          | 61 |
| 5.3.2           | DIMENSIONAMIENTO DEL BANCO DE BATERÍAS.....            | 61 |
| 5.3.2.4         | BANCO DE BATERÍAS.....                                 | 63 |
| 5.3.3           | DIMENSIONAMIENTO DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO. ....      | 64 |
| 5.3.3.1         | ELECCIÓN DEL PFV.....                                  | 64 |
| 5.3.3.2         | CANTIDAD DE PFV.....                                   | 65 |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 5.3.3.3 | ANÁLISIS DE TEMPERATURA. ....   | 65 |
| 5.3.3.4 | STRING Y ARREGLOS DE PANELES. ....  | 66 |
| 5.3.4   | CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DEL CONTROLADOR DE CARGA. ....                                    | 67 |
| 5.3.5   | ELECCIÓN DEL INVERSOR SOLAR. ....   | 68 |
| 5.3.6   | CÁLCULO DE FUSIBLE PARA EL BANCO DE BATERÍAS. ....  | 70 |
| 5.3.7   | RESUMEN DEL DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA. ....  | 71 |
| 6       | ANÁLISIS ECONÓMICO .....  | 72 |
| 6.1     | ESPECIFICACIÓN .....  | 72 |
| 6.2     | ELEMENTOS UTILIZADOS EN LA RED HÍBRIDA Y SISTEMA DE BOMBEO. ....                          | 72 |
| 6.3     | CONCEPTOS TOMADOS EN CUENTA DURANTE EL ANÁLISIS ECONOMICO. ....                           | 74 |
| 6.3.1   | PORCENTAJE DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA. ....  | 74 |
| 6.3.2   | PORCENTAJE DE ENERGÍA DE LA DISTRIBUIDORA. ....   | 74 |
| 6.3.3   | POTENCIA FOTOVOLTAICA DEMANDADA. ....   | 74 |
| 6.3.4   | POTENCIA DEMANDADA A LA DISTRIBUIDORA. ....   | 74 |
| 6.3.5   | TARIFA FOTOVOLTAICO PONDERADO. ....   | 74 |
| 6.3.6   | COSTO MENSUAL DISTRIBUIDORA. ....   | 74 |
| 6.3.7   | COSTO DE ENERGIZAR CON ENERGÍA FOTOVOLTAICA. ....   | 75 |
| 6.3.8   | RECUPERACIÓN ANUAL FOTOVOLTAICA. ....   | 75 |
| 6.3.9   | GASTO ANUAL CON LA DISTRIBUIDORA. ....  | 75 |
| 6.4     | CUADRO COMPARATIVO DEL ANÁLISIS ECONÓMICO. ....   | 75 |
| 6.4.1   | PUNTO DE EQUILIBRIO ENTRE LA GENERACION DE ENERGIA Y EL CONSUMO DE LA RED ELECTRICA ..... | 77 |
| 6.4.2   | COSTO DEL PROYECTO POR ETÁPAS .....   | 78 |
|         | CONCLUSIONES .....  | 79 |
|         | RECOMENDACIONES .....   | 81 |
|         | GLOSARIO TECNICO .....  | 82 |
|         | Términos encontrados en apartados de CAPITULO I .....                                     | 82 |
|         | Términos encontrados en apartados de CAPITULO II .....                                    | 84 |
|         | BIBLIOGRAFIA .....  | 86 |
|         | Bibliografía CAPITULO I .....   | 86 |
|         | Bibliografía CAPITULO II .....  | 87 |
|         | ANEXOS .....  | 88 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 Modelo circuito equivalente del motor para analizar.....   | 4  |
| Figura 2 Modelo equivalente para la determinación del torque. ....  | 6  |
| Figura 3 Curvas características de torque-velocidad para diversas cargas típicas. [2] .....   | 7  |
| Figura 4 Representación gráfica de Torque Vrs Frecuencia para motores de 1 a 5 HP. ....   | 7  |
| Figura 5 Incremento de temperatura para diferentes tipos de encapsulado de motores Vrs frecuencia.....  | 8  |
| Figura 6 Circuito eléctrico equivalente del motor de inducción en condiciones sinusoidales. [4]9  |    |
| Figura 7 Circuito equivalente modificado del motor de inducción para una tensión de alimentación del armónico k.....  | 10 |
| Figura 8 Modelo de la fuente no sinusoidal. ....  | 13 |
| Figura 9 Modelo equivalente del motor a frecuencias armónicas.....  | 13 |
| Figura 10 La variación en la densidad de corriente de Foucault como una función de la profundidad por debajo de la superficie de un conductor - variación conocida como el efecto piel.....           | 17 |
| Figura 11 Norma profundidades de penetración en función de las frecuencias utilizadas en la inspección de la corriente de Foucault para varios metales de diferentes conductividades eléctricas. .... | 17 |
| Figura 12 Curva de carga del sistema superpuesta en la curva de la bomba. ....  | 22 |
| Figura 13 Diferentes formas de mover un fluido por la diferencia de elevación. [9] .....  | 22 |
| Figura 14 Tipos de carga para la bomba a) Carga de succión positiva b) Carga de succión negativa. 23  |    |
| Figura 15 Curva de fricción del sistema y curva de carga del sistema. [10].....   | 25 |
| Figura 16 Diferentes tipos de cargas en la bomba, a) Max y Min, b) velocidades diferentes y c) estrangulación.....  | 27 |
| Figura 17 Regulación del tamaño del impulsor mediante torno y ajuste de la curva de la bomba. ....  | 28 |
| Figura 18 Curvas de rendimiento de la bomba .....   | 29 |
| Figura 19 Descripción, curva característica de una bomba. ....  | 29 |
| Figura 20 Curvas características de la bomba para diferentes diámetros de impulsor.....   | 30 |
| Figura 21 Posibles casos para una bomba, haciendo uso de la curva característica. ....  | 30 |
| Figura 22 Curvas características a distintas velocidades de una misma bomba a) altura-caudal; B) rendimiento-Caudal; C) Potencia-Caudal; D) De igual rendimiento en el diagrama Altura-Caudal.....    | 31 |
| Figura 23 Curva de carga de un sistema de bombeo movido a un punto óptimo haciendo variar la velocidad.....   | 32 |
| Figura 24 Diferentes tipos de cabezales de descarga. ....   | 33 |
| Figura 25 Diagrama del circuito principal de un Variador de Frecuencia [11].....  | 35 |
| Figura 26 forma de onda de la señal modulada por ancho de pulso.....  | 36 |
| Figura 27 Control de bomba haciendo uso de variador de frecuencia.....  | 37 |
| Figura 28 Sensor de presión y esquema de funcionamiento .....   | 38 |
| Figura 29 Sensores de presión de voltaje y corriente 3 y 2 hilos, esquema de conexión.....  | 39 |
| Figura 30 Relación entre la presión y la señal de corriente o voltaje de los sensores.....  | 40 |
| Figura 31 El Sol y su núcleo. ....  | 42 |
| Figura 32 El movimiento de traslación de la Tierra.....   | 43 |
| Figura 33 El movimiento de rotación de la Tierra.....   | 44 |
| Figura 34 El movimiento de precesión y nutación de la Tierra.....   | 45 |
| Figura 35 Figura del plano ecuatorial y la eclíptica. ....  | 45 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 36 Movimiento aparente del Sol visto desde el Ecuador de la Tierra.....             | 46 |
| Figura 37 Parámetros y ángulos de las coordenadas solares.....                             | 47 |
| Figura 38 Representación gráfica de la Hora Sol Pico.....                                  | 48 |
| Figura 39 Efecto fotovoltaico en una célula solar.....                                     | 49 |
| Figura 40 Célula fotovoltaica.....   | 50 |
| Figura 41 Curva de funcionamiento de la bomba elegida [16].....                            | 54 |
| <b>Figura 42</b> Catálogo de Motor propuesto para el sistema de bombeo de la marca GE..... | 57 |
| Figura 43 Catálogo de Variadores de Frecuencia de la marca Altivar. [15].....              | 58 |
| Figura 44 Diagrama de bloques del sistema híbrido propuesto.....                           | 60 |
| Figura 45 Características eléctricas de los modelos de baterías Freedom.....               | 63 |
| Figura 46 Arreglo de baterías calculado.....   | 64 |
| Figura 47 Datos eléctricos del panel Canadian Solar CS6P-235.....                          | 65 |
| Figura 48 Arreglo fotovoltaico calculado y la variación con la temperatura.....            | 66 |
| Figura 49 Parámetros eléctricos del controlador de carga seleccionado.....                 | 67 |
| Figura 50 Total de arreglos de paneles del sistema con sus controladores de carga.....     | 68 |
| Figura 51 Datos técnicos del inversor Steca Xtender XTM2600-48.....                        | 69 |
| Figura 52 Configuración de los inversores, 3 fases, 120/208 Vac, 6 Kw.....                 | 70 |
| Figura 53 Catálogo de fusibles de cuchillas a utilizar.....                                | 71 |
| Figura 54 Esquema final del sistema híbrido propuesto.....                                 | 71 |
| Figura 55 Curva de optimización de la red híbrida.....                                     | 77 |
| Figura 56 Costos de construcción del proyecto por etapas.....                              | 78 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1 Clases de aislamiento soportada por maquinas eléctricas.....   | 8  |
| Tabla 2 Límites de distorsión armónica de voltaje en redes de media y baja tensión. Fuente: (SIGET) [6].....   | 18 |
| Tabla 3 Coeficientes de Hazen Williams (C) .....   | 24 |
| Tabla 4 Coeficiente k para diferentes tipos de accesorios (perdidas secundarias) .....                         | 26 |
| Tabla 5 Velocidad media en tuberías que origina diseños más económicos.....                                    | 26 |
| Tabla 6 Comparación de los diferentes tipos de arranque basado en la corriente de arranque de los motores..... | 38 |
| Tabla 7 Especificaciones de sensores de presión para diferentes presiones.....                                 | 39 |
| Tabla 8 Algunos datos básicos acerca del sol.....  | 42 |
| Tabla 9 Rendimiento, características y fabricación de las células de silicio.....                              | 51 |
| Tabla 10 Características de la bomba elegida. ....   | 55 |
| Tabla 11 Datos de diferentes tipos de motores para propuesta. ....   | 56 |
| Tabla 12 Datos del motor elegido para la propuesta de laboratorio.....   | 57 |
| Tabla 13 Modelos y características de diferentes variadores de frecuencia .....                                | 58 |
| Tabla 14 Características del variador elegido. ....  | 59 |
| Tabla 15 Modelos y características de diferentes Sensores de presión. ....                                     | 59 |
| Tabla 16 Cuadro de consumo diario de energía. ....   | 61 |
| Tabla 17 Resumen de dispositivos y capacidad del sistema fotovoltaico.....                                     | 72 |
| Tabla 18 Elementos a usar .....  | 73 |
| Tabla 19 Costo de Equipo de bombeo Hidráulico .....  | 73 |
| Tabla 20 Comparativa económica con diferentes escenarios.....  | 76 |
| Tabla 21 Detalle de cantidad de elementos de acuerdo a Figura 56.....  | 78 |

## INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo de graduación se ha desarrollado una propuesta de diseño de un sistema de bombeo en circuito cerrado. Éste, funcionará como un banco de pruebas para prácticas de estimación de eficiencia de motores controlados por un variador de frecuencia. En base a fines didácticos, se espera la implementación de dicho banco para ser adecuado en el laboratorio de máquinas eléctricas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica. Enfocándose en las características de un variador de frecuencia, de manera directa se espera estudiar lo que es un arrancador progresivo enfocándose específicamente en el motor de propósito definido a emplear. También, una aplicación más práctica, y es el porqué de este trabajo, se estudiará el desempeño del sistema de bombeo sobre sus propias curvas características. Las dos maneras de hacer esto se basan en presión y en velocidad. La forma más económica y popular es con presión; es decir, utilizando válvulas de estrangulamiento. Con nuestro trabajo, hemos decidido incluir el factor velocidad para el estudio de esta característica. Esto es lo que se realiza con el variador de frecuencia. Al variar la frecuencia, se varía la velocidad y esta está intrínsecamente relacionada con el caudal o capacidad que fluirá por el sistema. Sin necesidad de hacer cambios de presión con las válvulas se espera ver como varía la eficiencia y el comportamiento del sistema.

Dicha propuesta está diseñada en base a cálculos respecto a las necesidades hidráulicas que se requieren para el acoplamiento del sistema de bombeo. Se ha documentado una serie de ecuaciones que sirvieron para la elección de bomba, motor, variador, sensores y demás equipo necesario para el correcto funcionamiento del banco de pruebas.

Como un valor agregado, presentamos el diseño alimentado desde una red híbrida: red eléctrica – planta fotovoltaica. Se ha hecho el estudio del requerimiento óptimo para la utilización atractiva en términos económicos debido a los costos en la construcción de una planta fotovoltaica. Esto quiere decir que se buscó encontrar el dimensionamiento adecuado. Además, el porcentaje de utilización fotovoltaico está calculado en base al análisis económico del proyecto híbrido. Se presentan resultados concluyentes de dicho análisis.

# **OBJETIVOS**

## **OBJETIVO GENERAL**

- Diseñar una propuesta para montar un banco hidráulico, para pruebas de eficiencia de un equipo de bombeo aplicando variadores de frecuencia.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar el parámetro de la eficiencia aplicando variadores de frecuencia en un equipo de bombeo.
- Acoplamiento de un banco de pruebas para prácticas de laboratorio en el área de máquinas eléctricas.
- Analizar la aplicación de una fuente híbrida fotovoltaica como fuente de energía aplicado a un equipo de bombeo.

## **ALCANCES**

Este documento, está elaborado con el fin de que sirva como base para la construcción del banco de pruebas de equipo de bombeo. Este trabajo representa el estudio técnico con el cual se espera, sea tomado en cuenta para la aprobación de un presupuesto destinado a la construcción del diseño propuesto. En un próximo trabajo de graduación, se esperaría que este diseño se lleve a la realidad mediante la construcción de todo lo especificado acá.

# CAPITULO I

## Estudio y descripción sobre características y conceptos sobre Motores asíncronos, Bombas centrífugas y Variadores de Frecuencia VFD, usados en estaciones de bombeo.

### 1 MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO

Es un tipo de motor alimentado con CA en el que la corriente eléctrica del rotor necesaria para producir torsión es proporcionada por inducción electromagnética debido al campo producido en el estator.

Está formado por un rotor tipo de jaula de ardilla, además del estator, en el que sus bobinas trifásicas están desfasadas entre sí  $120^\circ$  en el espacio. El campo magnético variable induce una tensión eléctrica en el rotor según la Ley de inducción de Faraday.

$$\varepsilon = \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{Ecuación 1}$$

El campo magnético  $\mathbf{B}$  inducido rota en sentido contrario a las manecillas del reloj, y la velocidad está dada por:

$$n_{sinc} = \frac{120 * f}{p} \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde:  $f$  es la frecuencia del sistema y  
 $p$  el número de polos de la máquina.

El voltaje inducido en la barra en el rotor está dado por:

$$e_{ind} = (\mathbf{V} * \mathbf{B}) * l \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde:  $\mathbf{V}$  es la velocidad de la barra relativa al campo magnético  
 $\mathbf{B}$  vector de densidad de flujo magnético  
 $l$  longitud del conductor en el campo magnético

### 1.1 ANÁLISIS DE CIRCUITO EQUIVALENTE DE MOTOR DE INDUCCIÓN

Con este análisis se pretende determinar una ecuación que represente la resistencia mecánica del rotor y la potencia mecánica a partir del modelo representado en la figura 1. [1]

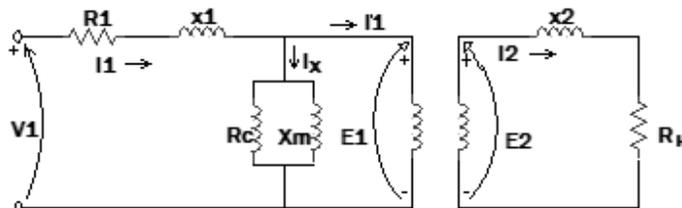


Figura 1 Modelo circuito equivalente del motor para analizar.

Deslizamiento:

$$s = \frac{n_s - n_{mec}}{n_s} \quad \text{Ecuación 4}$$

Velocidad angular mecánica:

$$\omega_{mec} = \frac{2\pi * n_{mec}}{60} \quad \text{Ecuación 5}$$

Reactancia del rotor:

$$X = j\omega L \quad \text{donde } \omega = 2\pi * f$$

$$X_r = j * 2\pi * f_2 * L_2$$

$$f_2 = f_1 * s$$

$$X_r = j * 2\pi * f_1 * s * L_2$$

$$X_r = js * \omega_1 * L_2 = s * X'_r$$

Corriente en el rotor:

$$I_2 = \frac{E_2}{R_r + js * \omega * L_2} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$I_2 = \frac{E_2}{R_r + s * X'_r}$$

Fem inducida:

$$E_2 = 4.44 * \Phi_m * f_2 * N * K * \omega \quad \text{Ecuación 7}$$

$$f_2 = s * f_1$$

$$I_2 = \frac{4.44 * \Phi_m * f_1 * s * N * K * \omega}{R_r + X'_r}$$

$$I_2 = \frac{s * [4.44 * \Phi_m * f_1 * N * K * \omega]}{R_r + X'_r}$$

$$I_2 = \frac{s * E'_2}{R_r + s * X'_r}$$

$$I'_2 = \frac{E'_2}{\frac{R_r}{s} + X'_r}$$

$$R'_2 = \frac{R_2}{s}$$

Resistencia mecánica del rotor

$$R_m = \frac{R_2}{s} (1 - s)$$

Ecuación 8

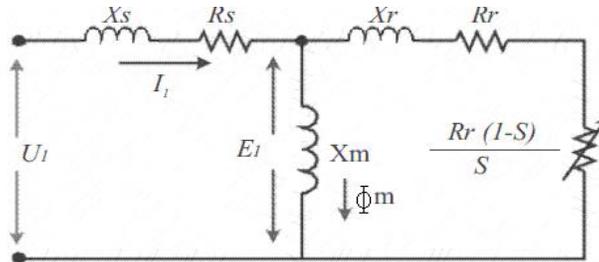


Figura 2 Modelo equivalente para la determinación del torque.

Flujo magnético

$$\Phi_m = \frac{E_1}{4.44 * f_1 * N_1 * K * \omega_1}$$

Ecuación 9

Potencia mecánica trifásica

$$P_{mec} = 3 * I_2'^2 * \frac{R_r}{s} (1 - s)$$

$$P_{mec} = T_{des} * \omega_{mec}$$

Ecuación 10

Potencia de entrada al entre hierro

$$P_G = 3 * I_2'^2 * \frac{R_r}{s}; s = 1$$

$$P_G = \frac{3 * R_r * V_s^2}{(R_s + R_r')^2 + (X_s + X_r')^2}$$

Ecuación 11

## 1.2 PAR DE ARRANQUE

Es el par que va a desarrollar el motor para romper sus condiciones iniciales de inercia y pueda comenzar a operar. [1]

Par inicial de arranque, en el arranque  $s=1$

$$T_{arr} = \frac{P_G}{\omega_s}$$

Ecuación 12

Par o Torque Max, es el par que puede desarrollar el motor sin perder sus condiciones de diseño, es decir, que es el límite en el que trabaja el motor sin consumir más corriente y voltaje, asimismo de que sus revoluciones son constantes, y conjuntamente está relacionado con el factor de servicio.

$$T_{\max} = \frac{3 \cdot V_1^2 \cdot R_s'^2}{\left( 2\omega_s \left[ R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_s + X_R)^2} \right] \right)}$$

Ecuación 13

### 1.3 CARGA DEL MOTOR

Entre los diferentes tipos de carga se puede establecer ciertas analogías en lo que respecta a la forma de la característica torque velocidad, tal como puede apreciarse en la figura 3.

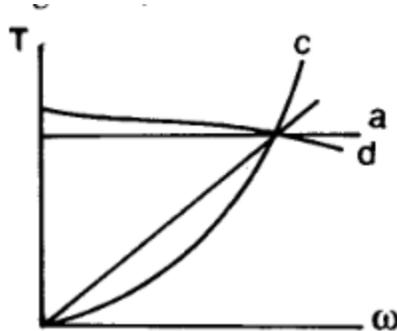


Figura 3 Curvas características de torque-velocidad para diversas cargas típicas. [2]

La curva A, es para cargas de par constante con respecto a la velocidad.

La curva B, es donde se da un torque proporcional a la velocidad

La curva C, es donde se relaciona el par con el cuadrado de la velocidad, este es el caso de la mayoría de máquinas eléctricas, siempre que al ponerlas en marcha no estén ya cargadas, así mismo los ventiladores y las bombas centrífugas con válvula de descarga abierta.

La curva D, representa las características de las cargas a base de rozamientos no lubricados.

Las cargas en los motores varían de forma proporcional con la frecuencia, siempre que esta sea mayor que la frecuencia fundamental, los variadores de velocidad que se encargan de manipular la frecuencia para operar la velocidad en el motor se muestra gráficamente en la figura 4.

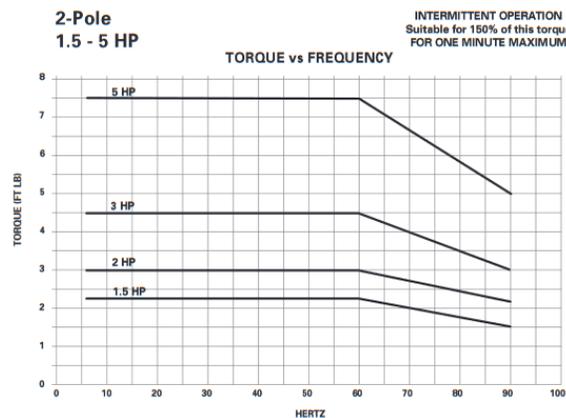


Figura 4 Representación gráfica de Torque Vrs Frecuencia para motores de 1 a 5 HP.

## 1.4 TIPO DE AISLAMIENTO, INVERTER DUTY MOTOR

Este tipo de motores están diseñados bajo la norma NEMA MG-1, Part 31 y cumplen con todos los requerimientos de aislamiento y eficiencia de trabajo para evitar el sobrecalentamiento cuando se opera con señales PWM, además están diseñados para proporcionar una protección superior contra las sobretensiones inducidas por variadores de frecuencia.

El tipo de Aislamiento de los motores en los devanados, juega un papel importante en la vida del motor, los aislamientos pueden ser de diferentes tipos y se caracterizan fundamentalmente por la temperatura que pueden manejar como máximo. A continuación, se designan diferentes clases de materiales aislantes, según la norma IEC y sus correspondientes temperaturas permanentes máximas admisibles de operación. [3]

**Tabla 1** Clases de aislamiento soportada por maquinas eléctricas.

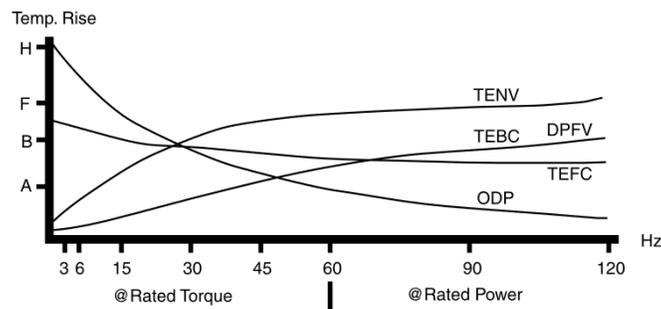
| clase de aislamiento    | O  | ó | A   | E   | B   | F   | H   | C    |
|-------------------------|----|---|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| temperatura límite (°C) | 90 |   | 105 | 120 | 130 | 155 | 180 | >180 |

### 1.4.1 ENCLAUSTRAMIENTO

Los Motores Inverter, además del tipo de aislamiento especial en sus arrollamientos, deben contar con un tipo de armazón diferente que según el uso que tendrá el motor se cuentan con los siguientes tipos.

- TENV (totally enclosed non-vented), no cuentan con ventilador de enfriamiento.
- TEBC (totally enclosed blower-cooled). Estos motores suelen tener una relación de velocidad de 1000:1
- TEFC (totally enclosed fan-cooled), los inverter Duty motor también pueden tener un ventilador de velocidad constante impulsado por separado para asegurar el enfriamiento a bajas velocidades ya que son totalmente cerrados y enfriados por ventilador
- ODP (Open Drip Proof)
- DPFC (Drip-proof force ventilated)

El comportamiento que tiene el incremento de la temperatura con respecto los diferentes tipos de encapsulados del motor es el que se muestra en la figura siguiente.



**Figura 5** Incremento de temperatura para diferentes tipos de encapsulado de motores Vrs frecuencia.

## 1.5 MOTORES DE EJE HUECO

Este tipo de motores está destinado a impulsar bombas que imponen altas cargas de empuje axial descendente, como bombas de pozos.

Los motores verticales flecha hueca se pueden utilizar en interior o intemperie, ya que por su diseño totalmente cerrado TCCVE, los bobinados, baleros, estator y rotor están libres de contaminación por polvo, humedad, y basura, lo que garantiza un funcionamiento confiable y duradero.

Para la ventilación propia tiene un ventilador axial, que absorbe el aire de refrigeración en dirección hacia el eje, a través del motor. La entrada de aire está en la caperuza del cojinete de arriba y la salida se encuentra al pie del motor. La corriente de refrigeración ventila el devanado del estator y la chapa. [13]

Cuentan con un seguro contra marcha atrás en caso de falta de energía de alimentación o una mala conexión que invierta el giro del motor

## 2 ARMÓNICOS

Las cargas no lineales tales como: rectificadores, inversores, variadores de velocidad, hornos, etc.; generan en la red, corrientes periódicas no senoidales. Estas corrientes están formadas por una componente fundamental de frecuencia de 60 Hz, más una serie de corrientes superpuestas de frecuencias, múltiplos de la fundamental, que denominamos armónicos eléctricos, que generan costes técnicos y económicos importantes.

El resultado es una deformación de la corriente, y como consecuencia de la tensión, conlleva una serie de efectos secundarios asociados, por ejemplo.

- La posibilidad de amplificación de algunos armónicos como consecuencia de resonancia serie y paralelo.
- La reducción en el rendimiento de los sistemas de utilización de la energía.
- El envejecimiento del aislamiento de los componentes de la red y, como consecuencia, la reducción de la energía.

### 2.1 ANÁLISIS DE ARMÓNICOS EN LOS MOTORES DE INDUCCIÓN

Si tenemos en cuenta que la eficiencia del sistema motor-bomba depende de la potencia incluyendo la calidad con que esta es suministrada, las distorsiones armónicas de diferente orden influyen en las pérdidas ocasionadas en el motor específicamente; es por ello que cuando se toma en cuenta los armónicos inyectados al motor de la bomba esta se expresa de la siguiente manera:

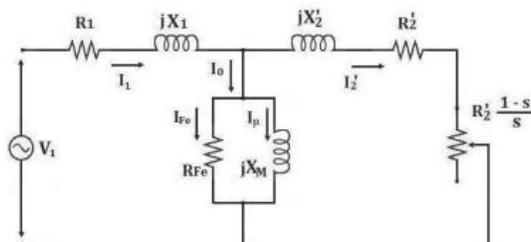
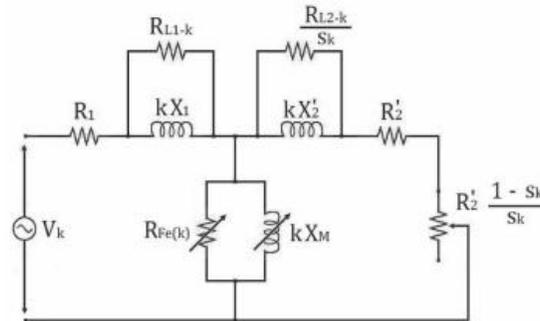


Figura 6 Circuito eléctrico equivalente del motor de inducción en condiciones sinusoidales. [4]

La Figura 7 se muestra el circuito eléctrico equivalente del motor de inducción para su operación con una tensión con frecuencia armónica k incluyendo la fundamental.



**Figura 7** Circuito equivalente modificado del motor de inducción para una tensión de alimentación del armónico k.

Los flujos magnéticos que causan pérdidas adicionales son representados por las reactancias de dispersión  $X_1$  para el estator y  $X_2$  para el rotor. Las pérdidas adicionales se representan entonces en sus componentes del estator y del rotor, ilustrados en la figura x como las resistencias  $R_{L1-k}$  y  $R_{L2-k}/s_k$ , acopladas en paralelo a las reactancias de dispersión del estator y rotor respectivamente y variables frente a cambios de la frecuencia [Honsinger, 1980]. Adicionalmente, la resistencia de pérdidas adicionales en el rotor depende del deslizamiento  $s_k$  propio de cada frecuencia armónica presente en la alimentación.

Una tensión a frecuencia armónica alimentando el motor provocará una variación de la velocidad de giro del campo magnético del entre hierro proporcional al orden del armónico, de forma que el deslizamiento  $s_k$  para un armónico k se expresa, en p.u. Según:

$$s_k = \frac{(k \cdot n_s \pm n)}{k \cdot n_s} \quad \text{Ecuación 14}$$

Dónde:

- $n_s$  es la velocidad sincrónica y
- $n$  es la velocidad angular del eje del motor, ambas en rpm.

Donde el signo  $\pm$  depende de la secuencia de fases del armónico k. El signo es negativo para armónicos de secuencia positiva ( $3n+1$ );  $n = 0, 1, 2, \dots$  Es positivo para armónicos de secuencia negativa ( $3n+2$ ). Los armónicos de secuencia cero ( $3n$ ) producen un campo pulsante que no afecta las interacciones electromagnéticas estator rotor, por lo que no se tienen en consideración.

La reactancia de dispersión del estator en función de la frecuencia y su respectiva variación ante el armónico k es:

$$X_{1(k)} = 2\pi(k \cdot f) \cdot L_1 = kX_{1(1)} \quad \text{Ecuación 15}$$

Igualmente se expresan las reactancias de magnetización y de flujos dispersos en el rotor:

$$X_{M(k)} = 2\pi(k * f) * L_M = kX_{M(1)}$$

Las pérdidas adicionales en el estator a frecuencia fundamental son determinadas a partir del circuito equivalente de la figura x según:

$$P_{L1-1} = I_{1L-1}^2 R_{L1-1}$$

Después de un análisis más complejo llegamos a la siguiente ecuación:

$$R_{L1-1} = \frac{X_{1(1)}}{\sigma} (1 + \sqrt{1 - \sigma^2})$$

Se define entonces  $\sigma$  como:

$$\sigma = \frac{2\lambda\eta V_1 \cos\Phi_1}{I_{1(1)} X_{1(1)}}$$

$$P_{L1-1} = \lambda P_{sal} = \lambda\eta V_1 I_{1(1)} \cos\Phi_1 = \lambda\eta I_{1(1)}^2 \bar{r}_{eq}$$

$$\eta_b = \frac{\sum P_{mi(k)}}{\sum P(k)}$$

Ecuación 16

Dónde:

$P_{mi(k)}$  es la potencia mecánica interna en watt generada para cada armónico de orden k, entendida como la potencia disipada por la resistencia de carga.

$P(k)$  es la potencia de entrada en watt para cada armónico k del circuito.

**Cálculo del factor de potencia con armónicos** El factor de potencia es la relación entre la potencia activa y la potencia aparente; la potencia activa en condiciones de armónicos es la suma algebraica de las potencias consumidas a cada frecuencia, mientras que la potencia aparente está determinada por la suma efectiva de los productos entre tensiones y corrientes

$$FP = \frac{\sum [V_k * I_{1(k)} * \cos(\Phi_k - \varphi_k)]}{\sqrt{[\sum v_k^2] * [\sum I_k^2]}}$$

Ecuación 17

Dónde:

$V_{(k)}$  es la tensión de alimentación en volts del circuito equivalente de la figura x para el armónico k.

$I_{1(k)}$  es la corriente en ampere del estator al armónico k y el término  $(\Phi_k - \varphi_k)$  es el factor de potencia determinado para cada armónico.

Fundamentalmente, las armónicas producen los siguientes efectos en las máquinas de corriente alterna: un aumento en sus pérdidas y la disminución en el torque generado.

## 2.2 EFECTOS POR DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LOS MOTORES

Las tensiones y corrientes que emanan de un VFD que llegan al motor están llenas de componentes de frecuencia armónica.

La tensión suministrada a un motor crea campos magnéticos en el núcleo, y provocan pérdidas de hierro en el marco magnético del motor.

Histéresis y pérdidas por corrientes parásitas son parte de las pérdidas de hierro que se producen en el núcleo debido al campo magnético alterno. Las pérdidas de histéresis son proporcionales a la frecuencia, y las pérdidas por corrientes parásitas que varían con el cuadrado de la frecuencia. Por lo tanto, los componentes de tensión de frecuencia más alta producen pérdidas adicionales en el núcleo de motores de corriente alterna, que, a su vez, aumentan la temperatura de funcionamiento del núcleo y los devanados de los alrededores en el núcleo. La aplicación de voltajes no sinusoidales a motores provoca la circulación de la corriente armónica en los bobinados de motores. La corriente rms neta es:

$$I_{rms} = \sqrt{[(I_1)^2 + (I_2)^2 + (I_3)^2 + \dots]} \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde, los subíndices 1, 2, 3, etc. representan las diferentes corrientes armónicas.

Las pérdidas  $I^2R$  en los bobinados del motor varían con el cuadrado de la corriente eficaz. Debido al efecto piel, las pérdidas reales serían ligeramente superiores a los valores calculados. Las pérdidas del motor, que incluyen pérdidas por corrientes Eddy o corrientes de Foucault en el devanado, debido a las variaciones de la frecuencia se dan pérdidas en el rotor y la superficie del estator.

Los armónicos se agrupan en

- positivo (+)
- negativo (-) y
- componentes de secuencia cero (0).

Los armónicos de secuencia positiva (números armónicos 4, 7,...,  $[3k + 1]$ , con  $k = 1, 2, \dots$ , etc.) producen campos magnéticos y corrientes que giran en la misma dirección que el armónico fundamental de frecuencia. Los armónicos de secuencia negativa (los números armónicos 2, 5,...,  $[3k + 2]$ ) desarrollan campos magnéticos y corrientes que giran en una dirección opuesta a la de ajuste de frecuencia positiva. Los armónicos de secuencia Cero (números armónicos 3, 6,...,  $[3k]$ ) no desarrollan par útil, pero producen pérdidas adicionales en la máquina. La interacción entre los campos magnéticos y corrientes de secuencia positiva y negativa produce oscilaciones de torsión del eje del motor. Estas oscilaciones dan lugar a vibraciones y si la frecuencia de las oscilaciones coincide con la frecuencia mecánica natural, las vibraciones se amplifican y se pueden producir graves daños en el eje del motor.

La fuente de tensión no sinusoidal se expresa así:

$$v(t) = \sqrt{2} [V_1 \text{sen}(wt) + \sum_{n=2}^{\infty} V_n \text{sen}(nwt + \theta_n)] \quad \text{Ecuación 19}$$

Dónde:

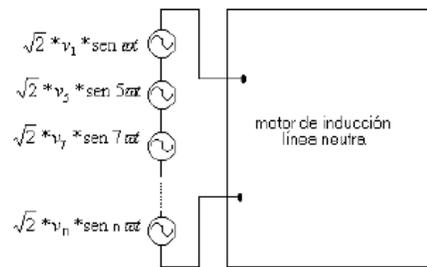
$V_1$  es la tensión fundamental

$V_n$  representa la tensión armónica de orden  $n$

$\theta_n$  es el ángulo de fase.

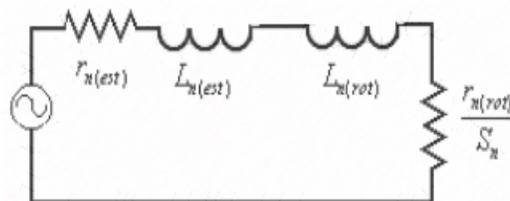
Los sub armónicos se definen para frecuencias menores de la fundamental. Por ejemplo,  $n = 0,1$  lo que equivale a 6 Hz, tomando como frecuencia fundamental 60 Hz.

El efecto de los armónicos en el motor de inducción, puede ser evaluado utilizando el principio de superposición como se muestra en la figura 8.



**Figura 8** Modelo de la fuente no sinusoidal.

El circuito equivalente del motor de inducción para cualquier armónico  $n$  es, aproximadamente, el de rotor bloqueado (véase la figura siguiente). Cuando  $n = 1$  corresponde al circuito a frecuencia fundamental sin tener en cuenta las pérdidas en el núcleo.



**Figura 9** Modelo equivalente del motor a frecuencias armónicas.

Dónde:

$r_{n(est)}$  es la resistencia del estator al armónico  $n$ .

$L_{n(est)}$  es la inductancia del estator a la armónica  $n$

$r_{n(rot)}$  es la resistencia del rotor al armónico  $n$ .

$L_{n(rot)}$  es la inductancia del rotor al armónico  $n$  y  $S$  es el deslizamiento al armónico  $n$ .

### 2.2.1 PÉRDIDAS I<sup>2</sup>R

Las pérdidas en el estator son determinadas utilizando la resistencia a corriente directa de la máquina, corregida a la temperatura especificada. Al operar la máquina de inducción con voltajes con contenido armónico no sólo aumentan estas pérdidas por el efecto piel que incrementa el valor de la resistencia efectiva, sino que también aumenta el valor de la corriente de magnetización, incrementándose aún más las pérdidas I<sup>2</sup>R.

Las pérdidas en el rotor aumentan de manera más significativa que las anteriores, por el diseño de la jaula en los motores de inducción que se basa en el aprovechamiento del efecto piel para el arranque. Esta resistencia aumenta en forma proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia y por ende las pérdidas.

Las Pérdidas en el núcleo son función de la densidad de flujo en la máquina. Éstas aumentan con excitación de voltaje no senoidal puesto que se tienen densidades de flujo pico más elevadas, sin embargo, su aumento es aún menor que el de las pérdidas mencionadas anteriormente e incluso son más difíciles de cuantificar.

### 2.2.2 CORRIENTE DE FOUCAULT O CORRIENTES EDDY

Son corrientes parásitas también conocida como "corrientes de remolino". Estas circulan en el interior de conductores como consecuencia de campos magnéticos variables con el tiempo en los mismos.

En los núcleos de bobinas y transformadores se generan tensiones inducidas debido a las variaciones de flujo magnético a que se someten aquellos núcleos. Estas tensiones inducidas son causa de que se produzcan corrientes parásitas en el núcleo, dichas corrientes transforman formas útiles de energía, como la cinética, en calor no deseado, por lo que generalmente es un efecto inútil, cuando no perjudicial. A su vez disminuyen la eficiencia de muchos dispositivos que usan campos magnéticos variables, como los motores eléctricos y los transformadores de núcleo de hierro.

### 2.2.3 PÉRDIDAS POR CORRIENTES DE EDDY

Son causadas por las corrientes inducidas que circulan en las láminas magnéticas del núcleo estatórico las que son inducidas por el flujo magnético giratorio en el estator. En efecto de acuerdo a la ley de Faraday el campo magnético variable en el tiempo crea campos eléctricos de trayectoria cerrada en el núcleo magnético y como el acero es un material conductor estos campos hacen circular corrientes (corrientes de Eddy) a través de su trayectoria cerrada, por esta razón el núcleo magnético se hace de láminas magnéticas. Por lo tanto, estas pérdidas dependen del flujo magnético máximo, de la frecuencia de variación del flujo magnético y de la resistividad del acero magnético.

Las corrientes de Parasitas, como ya se ha comentado, tienen por efecto transformar parte de la energía en calor. Dicho calor producido en la masa metálica sólo se utiliza en los hornos eléctricos de alta frecuencia, por lo que, en general, supone una pérdida de energía. Para el estudio de estas pérdidas, consideraremos a una chapa de longitud  $b$ , altura  $x$  y grosor  $a$ , sometida un campo variable de valor: [5]

$$B = B_m \sin(\omega t)$$

Dónde:  $\omega$  es la pulsación y  $B_m$  la inducción máxima.

En esta circunstancia el flujo a través de la superficie de dicha espira es:

$$\varphi = \mathbf{BS}$$

Donde S es la superficie que atraviesa el flujo, cuyo valor es

$$S = 2bx$$

Por lo tanto,

$$\varphi = (B_m \sin(\omega t)) 2bx$$

Por otra parte, sabemos que la Fem inducida en la espira es:

$$e = \frac{d\varphi}{dt}$$

Derivando se tiene:

$$e = (B_m \omega \cos(\omega t)) 2bx$$

Si tomamos en la chapa una espira diferencial, su resistencia será:

$$R = \rho \frac{2b + 2x}{a \cdot dx}$$

La potencia en la espira será:

$$dP = \frac{E_{ef}^2}{R}$$

Siendo  $E_{ef}$  la tensión eficaz, cuyo valor en función del máximo,  $E_m$

$$E_{ef} = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$$

Por lo tanto, la potencia perdida será:

$$dP = \frac{B_m^2 \omega^2 4b^2 x^2}{2R} = \frac{a \cdot dx}{\rho 4b} B_m^2 \omega^2 4b^2 x^2$$

Y la potencia total perdida a consecuencia de las corrientes de Foucault:

$$P = \int_0^{\frac{e}{2}} dP = \frac{1}{\rho} B_m^2 \omega^2 ba \left[ \frac{x^3}{3} \right]_{\frac{e}{2}}$$

Si reemplazamos ahora  $\omega$  por  $2\pi f$ , se obtiene

$$P = \frac{1}{\rho} B_m^2 4\pi^2 f^2 ba \frac{e^2}{24}$$

En donde  $b$  a  $e$ , es el volumen de la carga. De todo lo expuesto se deduce que las pérdidas en vatios por  $m^3$  debidas a las corrientes de Foucault serán:

$$P = \frac{\pi^2}{6\rho} e^2 B_m^2 f^2 \quad \text{Ecuación 20}$$

#### 2.2.4 EFECTO PIEL

Los conductores, al ser atravesados por campos magnéticos estos generan inducción de corrientes llamadas corrientes parasitas y son tantas como líneas de flujo existan, pueden ser infinitos puntos focalizados en la superficie, estas crean pérdidas de energía por la disipación de calor debido a la resistencia del cobre de los conductores en las bobinas.

La corriente parasita implica una disipación de energía en forma de calor lo cual conlleva a que en algunos elementos sea indeseable y se busque evitar para evadir daños en los equipos como en el caso de los motores y los transformadores, este efecto de transformación de energía se ha logrado llevar a usos más adecuados y lograr aplicaciones muy útiles en la sociedad como son las hoyas de inducción, que aprovechando las corrientes parasitas generan altas temperaturas que pueden llegar incluso a fundir minerales.

Además de la relación geométrica que existe entre la bobina de inspección y la muestra objeto de inspección, el grosor y la forma de la pieza va a afectar la respuesta de las corrientes de Foucault. Las corrientes de Foucault no están distribuidas uniformemente, sino que son más densas en la superficie inmediatamente debajo de la bobina y son cada vez menos densas, con aumento de la distancia por debajo de la superficie - un fenómeno conocido como efecto piel. A cierta distancia por debajo de la superficie de una pieza gruesa no habrá esencialmente corrientes que fluyen.

La figura 10 muestra como la corriente de Foucault varía en función de la profundidad bajo la superficie. La profundidad a la que se reduce la densidad de la corriente de Foucault a un nivel de alrededor del 37% de la densidad en la superficie se define como la profundidad del nivel de penetración. Esta profundidad depende de la conductividad eléctrica y permeabilidad magnética del material y de la frecuencia de la corriente magnetizaste. La profundidad de penetración disminuye con el aumento en la conductividad, la permeabilidad, o frecuencia de inspección. La profundidad estándar de penetración se puede calcular a partir de:

$$s = 1980 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \quad \text{Ecuación 21}$$

Dónde:

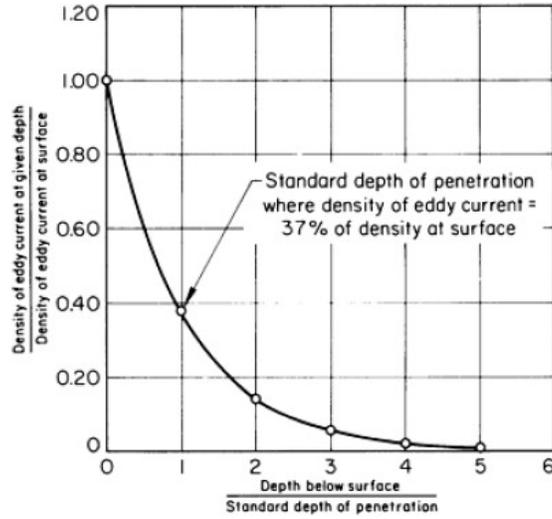
$S$  es la profundidad de penetración estándar

$\rho$  es la resistencia (en ohm-cm)

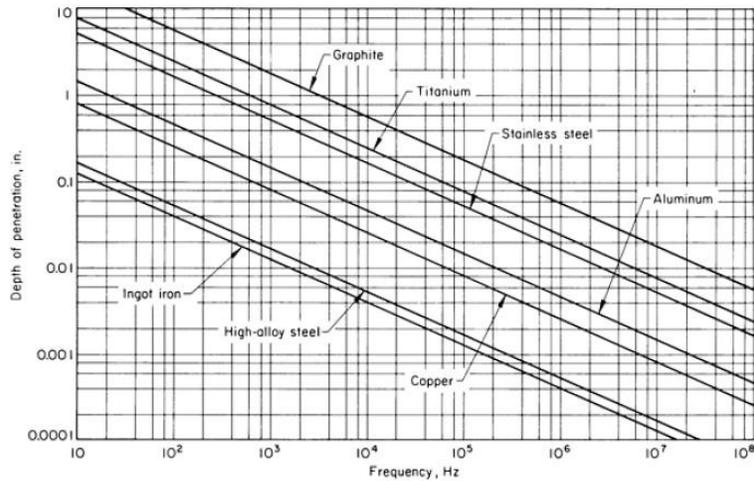
$\mu$  es la permeabilidad magnética (uno de los materiales no magnéticos)

$f$  es la frecuencia de las inspecciones (en Hertz)

La Resistividad, cabe señalar, es el inverso de la conductividad. La profundidad de penetración estándar, en función de la frecuencia de las inspecciones, se muestra en algunos metales en diferentes conductividades eléctricas de la figura.



**Figura 10** La variación en la densidad de corriente de Foucault como una función de la profundidad por debajo de la superficie de un conductor - variación conocida como el efecto piel.



**Figura 11** Norma profundidades de penetración en función de las frecuencias utilizadas en la inspección de la corriente de Foucault para varios metales de diferentes conductividades eléctricas.

En la Figura se observamos la variación en la densidad de corriente de Foucault como una función de la profundidad por debajo de la superficie de un conductor - variación conocida como el efecto piel. Figura 17 Norma profundidades de penetración en función de las frecuencias utilizadas en la inspección de la corriente de Foucault para varios metales de diferentes conductividades eléctricas. Las respuestas de las corrientes de Foucault obtenidas reflejan el espesor del material de la pieza.

### 2.3 ARMONICOS EN MOTORES DE INDUCCIÓN

El comportamiento de las máquinas de inducción varía cuando son alimentadas con fuentes que contienen tensiones armónicas. En esta parte se trata de describir las condiciones de operación y efectos de los armónicos de tensión en los motores de inducción trifásicos.

Básicamente se describe lo siguiente:

- modelo
- vida útil
- aumento de la temperatura
- pérdidas adicionales
- factor de potencia
- eficiencia
- torques pulsantes y pérdida de capacidad de potencia.

Los armónicos son corrientes o tensiones, o ambos, presentes en un sistema eléctrico, con frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental.

## 2.4 LÍMITES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN SISTEMAS DE ENERGÍA

Según las Normas de Calidad del Servicio de la SIGET art. 45 se establece el límite de distorsión armónica de la energía entregada, según las siguientes ecuaciones:

$$TDI = \frac{U_n}{U_1} * 100\% \quad \text{Ecuación 22}$$

$$VDAT = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{25} U_n^2}}{U_1} * 100\% \quad \text{Ecuación 23}$$

Dónde:

TDI: Tasa de distorsión individual

VDAT: Tasa de distorsión armónica total

Un: Amplitud del voltaje de la armónica n

U1: Amplitud del voltaje a la frecuencia fundamental (60 Hz)

Los límites de distorsión armónica de tensión en media y baja tensión, no deben ser superados durante más del cinco por ciento (5 %) del período de medición, tomando en cuenta que el análisis de cumplimiento debe realizarse para cada una de las fases existentes en el punto de medición.

**Tabla 2** Límites de distorsión armónica de voltaje en redes de media y baja tensión. Fuente: (SIGET) [6]

| Órdenes impares no múltiplos de 3 (n)                       | Tasa de distorsión individual (%) | Órdenes impares múltiplos de 3 (n) | Tasa de distorsión individual (%) | Órdenes pares (n) | Tasa de distorsión individual (%) |
|---|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| 5   | 6.0                               | 3                                  | 5.0                               | 2                 | 2.0                               |
| 7   | 5.0                               | 9                                  | 1.5                               | 4                 | 1.0                               |
| 11  | 3.5                               | 15                                 | 0.3                               | 6                 | 0.5                               |
| 13  | 3.0                               | 21                                 | 0.2                               | 8                 | 0.5                               |
| 17  | 2.0                               | >21                                | 0.2                               | 10                | 0.5                               |
| 19  | 1.5                               |                                    |                                   | 12                | 0.2                               |
| 23  | 1.5                               |                                    |                                   | >12               | 0.2                               |
| 25  | 1.5                               |                                    |                                   |                   |                                   |
| >25   | 0.2+1.3*25/n                      |                                    |                                   |                   |                                   |
| <b>LÍMITE DE LA TASA DE DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL = 8 %</b> |                                   |                                    |                                   |                   |                                   |

El contenido de distorsión armónica de tensión total e individual, es definido también por la norma IEEE Std 519: [7]

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} v_n^2}}{V_1} * 100\% \quad \text{Ecuación 24}$$

$$THDv\_indi = \frac{V_n}{V_1} * 100\% \quad \text{Ecuación 25}$$

Dónde:

THDv es la distorsión armónica total de tensión y

THDv\_indi es la distorsión armónica individual de tensión.

Los límites para la distorsión armónica de tensión total e individual en instalaciones industriales recomendados por la IEEE Std 519 son de 5 y 3%, respectivamente.

Debido a que esta es una desviación de una onda sinusoidal pura, la desviación está en la forma de una función periódica, y por definición, la distorsión de la tensión contiene armónicos.

Cargas no lineales, donde la corriente y la tensión tienen formas de onda que son no sinusoidal, por lo que la forma de onda de 60 Hz tiene numerosas formas de onda adicionales superpuestas que son armónicas de la frecuencia fundamental.

## 2.5 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE MOTORES

Algunos de los factores que intervienen en la elección de un motor asíncrono de jaula de ardilla son los siguientes:

- Las características de la red de suministro.
- Las características del ambiente.
- los gastos de instalación, mantenimiento, reparación, control y operación de la máquina.
- Las características de la carga.

Cuando se requiere las características de un motor especializado, como un invertir Duty motor que trabaja con variador de frecuencia se debe además de lo antes mencionado, considerar lo siguiente:

- Requisitos de aceleración y desaceleración de la tasa proceso que está siendo controlado.
- Los requisitos de lanzamiento, incluida la frecuencia de partida y una descripción de la carga (reflejada inercia en el motor, par de carga durante el arranque).
- Si la aplicación es un proceso continuo o debe tener ciclos de arranques, paradas y cambios de velocidad.
- Una descripción general del tipo de aplicación, incluida el medio ambiente en el que los componentes del sistema VFD debe operar (determina el recinto del motor).

Las características del ambiente, dependiendo del tipo de uso que se le dará al motor se deben tomar en cuenta el tipo de frame a utilizar.

El mantenimiento de la maquina se debe tomar en cuenta debido al uso que se le dará, el tiempo de vida útil se reduce si no se toma en cuenta el propósito que tendrá el motor.

Las características de la carga es decir la potencia nominal, la velocidad, el tiempo de aplicación de la carga son factores que se deben tomar en cuenta al momento de la selección de un motor.

El motor debe tener las características de diseño tensión, frecuencia, potencia mecánica nominal, torque de arranque, corriente de arranque, la forma y ejecución constructiva, la clase de aislamiento, dimensiones y peso, además de la eficiencia que es muy importante hoy en día.

### **3 BOMBAS CENTRIFUGAS.**

Una bomba centrífuga transforma la energía mecánica de un impulsor rotatorio en la energía cinética y potencial que se necesitan, también llamadas bombas roto-dinámicas son las más utilizadas en la actualidad para bombear líquidos de casi cualquier tipo. El 80% de la producción mundial de bombas está constituido por las bombas centrífugas.

Son del tipo bomba hidráulica que transforma la energía mecánica de un impulsor. El fluido entra por el centro de un rodete que se compone por unos alabes para conducir el fluido y por la acción de la fuerza centrífuga es impulsado hacia el exterior donde es recogido por la caja o carcasa de la bomba que por el contorno su forma lo conduce hacia las tuberías de salida o hacia el siguiente rodete.

#### **3.1 BOMBA VERTICAL**

Las bombas verticales generalmente cuentan con un motor posicionado a un nivel superior al de la bomba, por lo que cuenta con la posibilidad de que la bomba trabaje rodeada por el líquido a bombear, estando sin tener peligro de que el motor se pueda dañar

##### **3.1.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS VERTICALES**

- Ocupan un espacio horizontal mínimo, sólo el necesario para acomodar el motor vertical y la impulsión.
- Cuentan con un eje alargado, el cual puede ser rígido o flexible por medio de juntas universales.
- Simplifican el constante problema del alineamiento.

##### **3.1.2 VENTAJAS QUE OFRECEN LAS BOMBAS VERTICALES**

- Las bombas verticales, para altas cargas dinámicas y buenos rendimientos; Las bombas verticales se pueden acoplar multietapas de impulsores.
- El montaje y desmontaje se simplifica contando solo con un amplio espacio vertical superior, para permitir el libre movimiento.
- Espacio mínimo, pues éstas requieren un área pequeña horizontal.

#### **3.2 POTENCIA REQUERIDA POR LA BOMBA Y EL MOTOR**

La potencia de la bomba para un sistema hidroneumático, representa la potencia requerida por la bomba para transferir líquidos de un punto a otro y la energía requerida para vencer sus pérdidas. Podrá calcularse por la fórmula siguiente: [9]

$$P = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_B}{\eta}$$

Ecuación 26

- $\gamma$ = Densidad del agua 1 000 kg/m<sup>3</sup>

- Q = Caudal en (m<sup>3</sup> /s)
- H<sub>b</sub>= C.D.T. (Carga dinámica total) en (m)
- η = Eficiencia de la bomba
  - Bombas pequeñas ¾" a 2" de succión η= 30 – 50%.
  - Bombas medianas 2" a 6" de succión η= 50 – 75%.
  - Bombas grandes 6" o mayores η= 75 – 80%.

La potencia eléctrica que consume un motor trifásico

$$P_{motor} = V_{LL} \cdot I_L \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi \quad \text{Ecuación 27}$$

### 3.2.1 EFICIENCIA DE LA BOMBA

La eficiencia de la bomba es un conjunto entre la eficiencia del motor y la eficiencia de la bomba, debido a que la potencia tomada de la red para la alimentación del motor es transformada en potencia mecánica, en virtud de las pérdidas hidromecánicas que suceden en el interior de la Bomba, se tendrá que la potencia que ésta le suministra al fluido es menor que la que el motor le imprime.

$$\eta_b = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_b}{P} \quad \text{Ecuación 28}$$

Dónde:

P = potencia bomba (w)

γ = peso específico (N/m<sup>3</sup>)

Q = caudal (m<sup>3</sup>/s)

H<sub>b</sub> = altura manométrica total (m)

η<sub>b</sub> = rendimiento de la bomba.

La potencia absorbida por la bomba, es la que suministra el motor multiplicada por el rendimiento de dicho motor (η<sub>m</sub>).

$$P_b = P_m \cdot \eta_m \quad \text{Ecuación 29}$$

### 3.3 CARGA DEL SISTEMA.

Es la entrega de un cierto volumen de fluido requerido por el sistema, la bomba debe aplicar al fluido una energía que está compuesta por:

- Carga estática.
- Diferencias de presiones en las superficies de los líquidos.
- Carga de fricción.
- Perdida de entrada y salida.

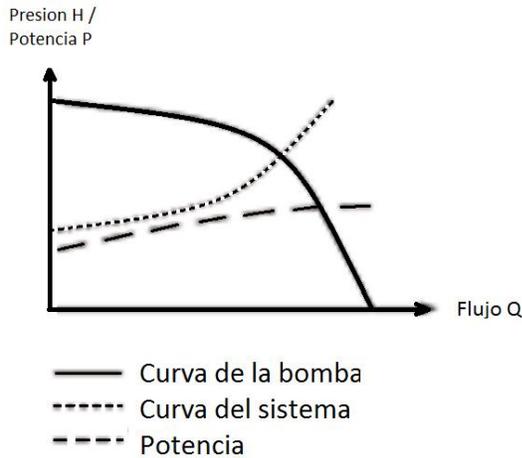


Figura 12 Curva de carga del sistema superpuesta en la curva de la bomba.

Hay tres factores que inciden de una manera directa en la fuerza centrífuga de la bomba:

- La velocidad en la punta de los alabes o también llamada periferia del impulsor.
- La densidad del líquido.
- La cantidad de energía que se aplica por libra de líquido es independiente de la densidad del fluido.

Es importante que la presión en el fluido en cualquier punto del sistema no caiga por debajo de la presión de vapor del líquido, ya que este defecto provoca daños en las bombas.

### 3.3.1 CARGA ESTÁTICA.

Esta carga significa un cambio de elevación.

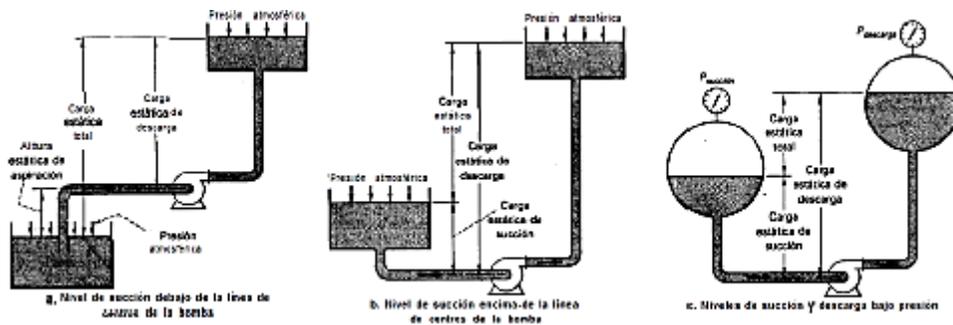


Figura 13 Diferentes formas de mover un fluido por la diferencia de elevación. [9]

La diferencia en elevación entre los niveles de líquido en los puntos de descarga y succión de la bomba (figura 13a). La carga estática de descarga es la diferencia en elevación entre el nivel del líquido de descarga y la línea de centros de la bomba (figura 13b). Si la carga estática de succión tiene un valor negativo es porque el nivel del líquido para succión está por debajo de la línea de centros de la bomba, se le suele llamar altura estática de aspiración.

### 3.3.2 CARGA NETA DE SUCCIÓN POSITIVA

Para la selección de bombas, la carga neta de succión positiva (NPSH) garantiza que no se produzca el fenómeno de la cavitación el cual genera burbujas al interior del sistema y lo deteriora.

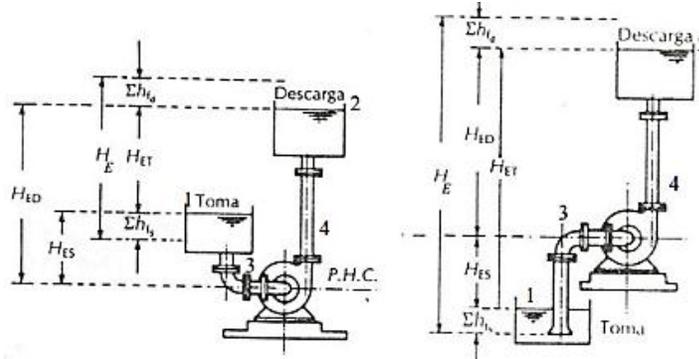


Figura 14 Tipos de carga para la bomba a) Carga de succión positiva b) Carga de succión negativa.

Para evitar la cavitación, se debe cumplir:

$$\text{NPSH}_D > \text{NPSH}_R \quad \text{Ecuación 30}$$

Dónde:

$\text{NPSH}_D$  = Disponible en el sistema.

$\text{NPSH}_R$  = Requerida, dada por el fabricante.

$$\text{NPSH}_D = \frac{P_{\text{atm}} - P_v}{\gamma} - Z_s - H_l \quad \text{Ecuación 31}$$

$P_{\text{atm}}$  = Presión atmosférica

$P_v$  = Presión de Vapor

$Z_s$  = Altura geométrica desde el nivel del fluido a la línea de succión de la bomba

$H_l$  = Pérdidas totales en el tramo de succión (locales más longitudinales o por fricción).

### 3.4 PÉRDIDAS DE CARGA EN EL SISTEMA

Debido a que existen pérdidas e incrementos de energía, estos se deben incluir en la ecuación de Bernoulli. Por lo tanto, el balance de energía para dos puntos de fluido puede escribirse, considerando las pérdidas por razonamiento del punto uno al punto dos ( $hf_{1-2}$ ) de la siguiente manera:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + z_1 + H_b = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + z_2 + H_{f1-2} + H_s \quad \text{Ecuación 32}$$

#### LA PÉRDIDA DE CARGA DEBIDO A LA FRICCIÓN EN LAS TUBERÍAS, PERDIDAS PRIMARIAS.

Este tipo de pérdidas se durante todo el tramo de tubería y depende del diámetro y tipo de material del que está compuesto el ducto, se puede determinar mediante las ecuaciones siguientes:

$$H_f = \zeta \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \quad \text{Ecuación 33}$$

Donde

- $H_f$  = Perdidas por fricción en tubería
- $\zeta$  = Factor de fricción de Darcy
- $L$  = Longitud de la tubería
- $D$  = Diámetro interno de la tubería
- $v$  = Velocidad promedio de la tubería
- $g$  = Gravedad  $9,8 \text{ m/s}^2$

También se puede utilizar la siguiente ecuación más directa Hazen Williams

$$\%H_f = \frac{10,674 * Q^{1.85} * L}{C^{1.85} * D^{4.87}} \quad \text{Ecuación 34}$$

Donde

- $\%H_f$  = Perdidas por fricción en tubería en (m)
- $Q$  = Caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
- $L$  = Longitud de la tubería (m)
- $D$  = Diámetro interno de la tubería (m)
- $C$  = Constante de rugosidad

**Tabla 3** Coeficientes de Hazen Williams (C)

| Material                          | Coeficiente de Hazen-Williams |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| Asbesto – cemento (nuevo)         | 135                           |
| Cobre y latón                     | 130                           |
| Ladrillo de saneamiento           | 100                           |
| Hierro fundido, nuevo             | 130                           |
| Hierro fundido, 10 años de edad   | 107 - 113                     |
| Hierro fundido, 20 años de edad   | 89 - 100                      |
| Acero galvanizado (nuevo y usado) | 125                           |
| Acero remachado nuevo             | 110                           |
| PVC                               | 140                           |
| Aluminio                          | 130                           |

Fuente: <http://www.fagro.edu.uy>.

### 3.4.1 PERDIDAS EN LA ENTRADA Y SALIDA.

Si la toma de la bomba está en un depósito, tanque o cámara de entrada, las pérdidas ocurren en el punto de conexión de la tubería de succión con el suministro. La magnitud de las pérdidas depende del diseño de la entrada al tubo.

### 3.4.2 CURVAS DE FRICCIÓN Y DE CARGA DEL SISTEMA.

Para resolver problemas de bombeo es conveniente indicar la relación, en forma de gráfica, entre la capacidad y las pérdidas de carga de fricción. Estas pérdidas, por tanto, se calculan con algún flujo predeterminado, sea el esperado o el de diseño, y luego se calcula para todos los demás flujos con el empleo del cuadrado de la relación de flujo.

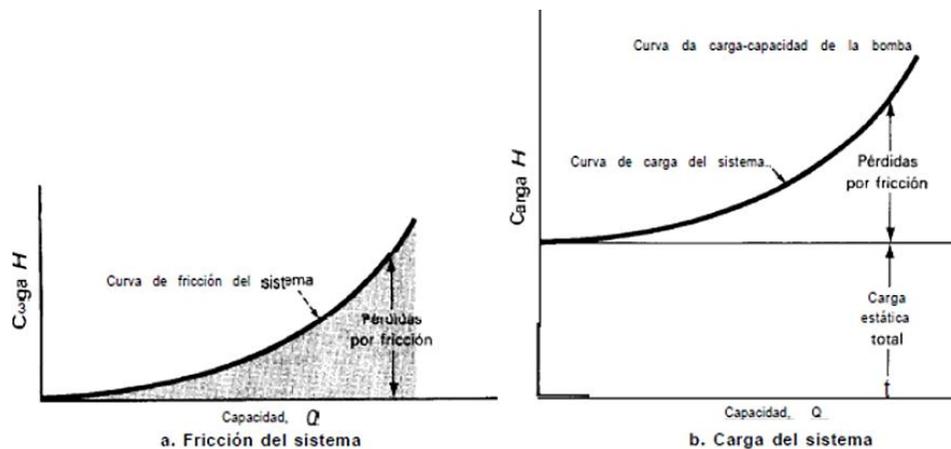


Figura 15 Curva de fricción del sistema y curva de carga del sistema. [10]

La curva resultante se llama curva de fricción del sistema (figura 13a). Cuando se combinan las cargas estáticas, la diferencia en presión y las pérdidas de carga de fricción de cualquier sistema, y se trazan contra la capacidad, la curva resultante (figura 13b) se llama curva de carga del sistema. Al superponer una curva de capacidad contra carga de la bomba a velocidad constante sobre esta curva de carga del sistema (figura 13b) se podrá determinar la capacidad en el punto en que se cruzan las dos curvas. Ésta es la capacidad que entregará al sistema esa bomba a esa velocidad particular.

### 3.4.3 LA PÉRDIDA DE CARGA DEBIDO A ACCESORIOS, PERDIDAS SECUNDARIAS.

$$H_s = k \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

Ecuación 35

Dónde:

- $H_s$  = Perdidas por accesorios
- $k$  = Coeficiente de accesorio
- $v^2/2 \cdot g$  = Carga de velocidad en el accesorio

**Tabla 4** Coeficiente k para diferentes tipos de accesorios (perdidas secundarias)

| Accesorio                                   | k         |
|---|-----------|
| Válvula de globo, completamente abierta     | 10.0      |
| Válvula en ángulo, completamente abierta    | 5.0       |
| Válvula de cheque, completamente abierta    | 2.5       |
| Válvula de compuerta, completamente abierta | 0.2       |
| Válvula de compuerta, con ¼ de apertura     | 1.00-1.15 |
| Válvula de compuerta, con ½ de apertura     | 5.6       |
| Válvula de compuerta, con ¾ de apertura     | 24.0      |
| Codo de radio corto ( $r/d = \pm 1$ )       | 0.9       |
| Codo de radio mediano                       | 0.75-0.80 |
| Codo de gran radio ( $r/d = \pm 1.5$ )      | 0.6       |
| Codo de 45°                                 | 0.4-0.42  |
| Retorno (curva en U)                        | 2.2       |
| Tee en sentido recto                        | 0.3       |
| Tee a través de la salida lateral           | 1.8       |
| Unión                                       | 0.3       |
| Ye de 45°, en sentido recto                 | 0.3       |
| Ye de 45°, salida lateral                   | 0.8       |
| Entrada recta a tope                        | 0.5       |
| Entrada con boca acampanada                 | 0.1       |
| Entrada con tubo reentrante                 | 0.9       |
| Salida                                      | 1.0       |

### 3.5 DETERMINACIÓN DEL DIÁMETRO EN LA TUBERÍA

Para de los diámetros de tramos en una red, se consideran las velocidades mínimas y máximas señaladas, es decir que los diámetros escogidos deben producir velocidades dentro de estos límites. La tabla expresa la velocidad media según el tipo de tubería.

**Tabla 5** Velocidad media en tuberías que origina diseños más económicos

**TABLA 9.4.** Velocidad media más económica en tuberías, en m/seg según Richter

|  |           |
|--|-----------|
| Tuberías de succión en bombas centrífugas, de acuerdo con la carga de succión, longitud, temperatura del agua (< 70°C) | 0.5 a 1   |
| Tuberías de descarga en bombas   | 1.5 a 2   |
| Redes de distribución para agua potable e industrial   |           |
| Tuberías principales   | 1 a 2     |
| Tuberías laterales   | 0.5 a 0.7 |
| Tuberías muy largas  | 1.5 a 3   |
| Tuberías en instalaciones hidroeléctricas con turbinas   |           |
| Con inclinación y diámetro pequeño   | 2 a 4     |
| Con inclinación y diámetro grande  | 3.6 a 8   |
| Horizontales y gran longitud   | 1 a 3     |

Fuente: Ávila, Gilberto Sotelo. Hidráulica general p. 367.

Con el caudal y el rango de velocidades determinados, es posible conocer el diámetro aproximado de la tubería a través de la ecuación de continuidad.

$$Q = A \cdot v \quad \text{Ecuación 36}$$

$$D = \sqrt{\frac{(4 \cdot Q_{bombeo})}{(\pi \cdot v)}} \quad \text{Ecuación 37}$$

Dónde:

- A = Área de la tubería
- D = Diámetro de la tubería
- Q = Caudal del fluido
- v = Velocidad del fluido

### 3.5.1 TRAMO DE SUCCIÓN

Para la elección del tipo de tubería a utilizar en el tramo de succión, se tienen en cuenta un par de requerimientos de diseño referidos al caudal y la velocidad máxima del flujo en este tramo. A partir de este par de datos se calcula el diámetro mínimo que debe tener la tubería para transportar tal caudal sin sobrepasar el límite de velocidad.

$$D_{min} = \sqrt{\frac{(4 \cdot Q_B)}{(\pi \cdot v_{max})}} \quad \text{Ecuación 38}$$

Cualquier diámetro mayor a este soportará el caudal requerido sin superar la velocidad límite, por tanto, debemos elegir el diámetro comercial mayor más cercano a

### 3.5.2 TRAMO DE IMPULSIÓN

Partiendo del valor máximo de velocidad en el impulsor y debido a que el caudal se mantiene, se calcula el mínimo valor del diámetro para la tubería de este tramo:

$$D_{min} = \sqrt{\frac{(4 \cdot Q_B)}{(\pi \cdot v_{max})}} \quad \text{Ecuación 39}$$

### 3.6 VARIACIONES EN EL FLUJO DESEADO.

En general, el proceso en que trabaja la bomba centrífuga tiene demanda variable. Una bomba en un sistema dado sólo entregará la capacidad correspondiente a la intersección entre las curvas de carga contra capacidad y de carga del sistema. Para variar la capacidad es necesario cambiar la forma de una o de ambas curvas.

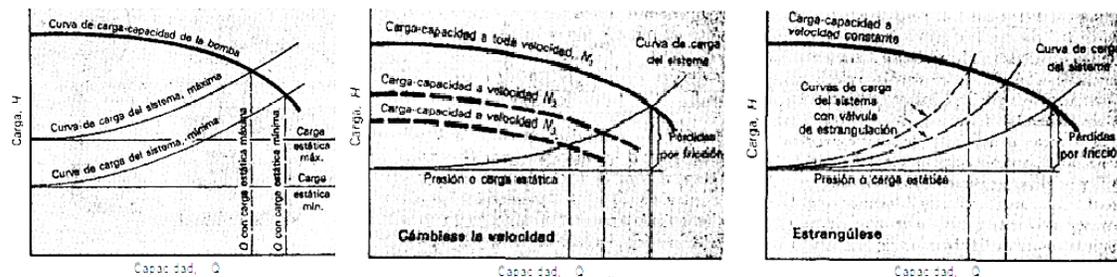
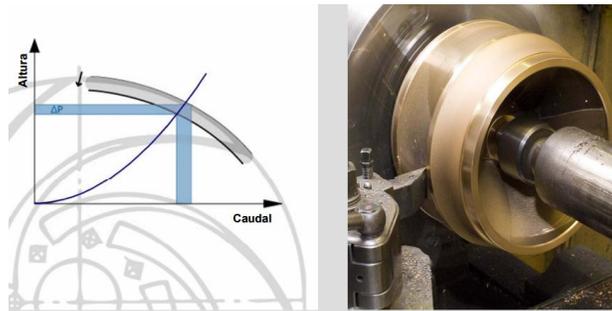


Figura 16 Diferentes tipos de cargas en la bomba, a) Max y Min, b) velocidades diferentes y c) estrangulación.

En sistemas que tienen cargas estáticas o diferencias de presión variables, es posible trazar curvas que correspondan a las condiciones mínimas y máximas (figura 16a). Después, las intersecciones con la curva de carga-capacidad de la bomba determinarán los flujos mínimo y máximo que entregará la bomba en el sistema. Para cambiar la curva de carga contra capacidad se hace funcionar la bomba a velocidad variable (figura 16b), o bien, la curva de carga del sistema se puede alterar si se produce una pérdida por fricción con una válvula de estrangulación (figura 16c). Por supuesto, la diferencia entre la carga total producida por la bomba y la carga requerida por la curva de carga del sistema representa desperdicio de energía durante la estrangulación.

### 3.7 RECORTE DE IMPULSOR

Las bombas sobredimensionadas, cuando se encuentran lejos del punto de diseño y máxima eficiencia, y/o reguladas por estrangulamiento, se puede mejorar el consumo energético sustituyendo o ajustando el diámetro del impulsor actual, ante un minucioso estudio especializado previo. Este procedimiento constituye un menor consumo de energía, con el consiguiente ahorro económico. La energía más rentable es la que no se consume.



**Figura 17** Regulación del tamaño del impulsor mediante torno y ajuste de la curva de la bomba.

### 3.8 EFICIENCIA DETERMINADA A PARTIR DE LA CURVA DE LA BOMBA

Un sistema de bombeo funciona donde la curva de la bomba y la curva de resistencia del sistema se cruzan. La intersección de las dos curvas define el punto de operación de la bomba y del proceso. Sin embargo, es imposible para un punto de funcionamiento cumplir con todas las condiciones de funcionamiento deseadas. Por Ejemplo, cuando la válvula de descarga es estrangula, la resistencia del sistema desplaza la curva a la izquierda y lo mismo ocurre con el punto de operación.

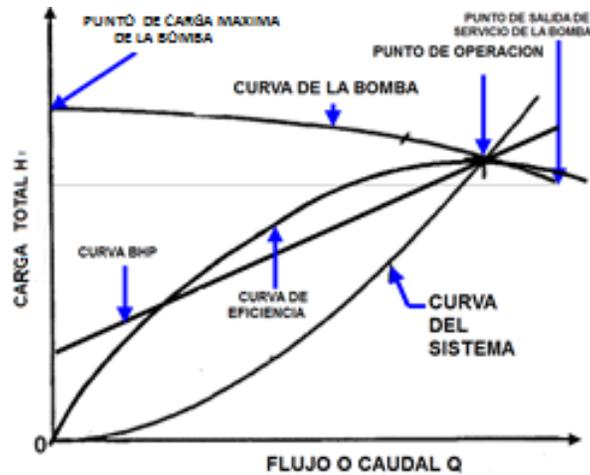


Figura 18 Curvas de rendimiento de la bomba

### 3.9 EXPLICACIÓN DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS

Las curvas características de las bombas son estáticas, definidas para un solo diámetro de los alabes y una velocidad de funcionamiento específica, normalmente en las curvas se encuentran los parámetros de eficiencia y potencia, con esto se determina la capacidad a la cual la bomba puede encontrarse trabajando, a la mayor eficiencia se le denomina punto de máxima eficiencia, que es donde idealmente se desearía que la curva del sistema se encuentre.

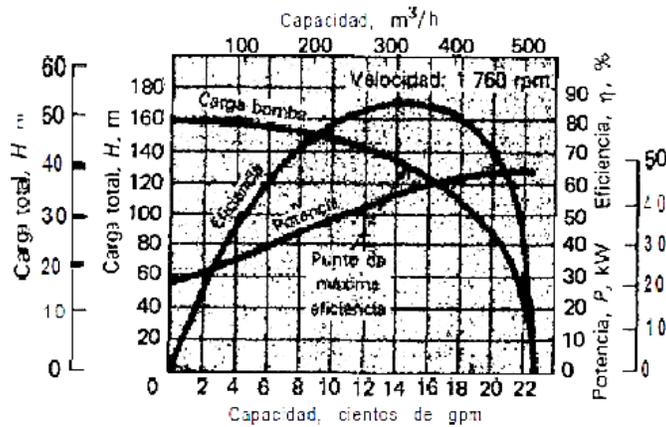


Figura 19 Descripción, curva característica de una bomba.

El comportamiento del sistema se puede modificar mediante la variación de la velocidad de funcionamiento, debido a que normalmente es a una velocidad constante, también se puede modificar variando el diámetro de los álabes, estos pueden ser torneados a diámetros que podrían no ser especificados dentro de los catálogos de las bombas lo que haría necesario el uso de ecuaciones de afinidad para determinar las nuevas medidas de eficiencia potencia y carga de la bomba.

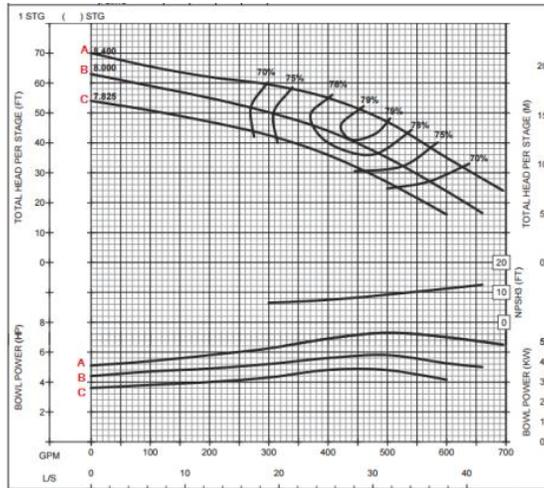


Figura 20 Curvas características de la bomba para diferentes diámetros de impulsor.

Uso de las curvas características para diferentes diámetros del impulsor.

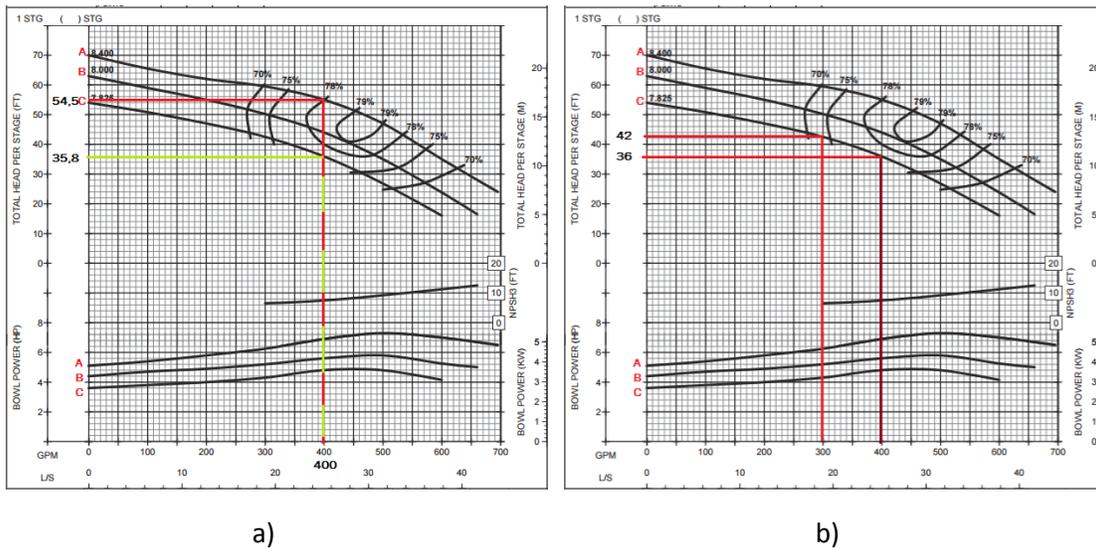


Figura 21 Posibles casos para una bomba, haciendo uso de la curva característica.

En la curva característica a) de la bomba, se muestra el requerimiento que puede ser necesario donde para un mismo caudal, el diámetro del impulsor varía evidentemente la carga que puede manejar el sistema, de 35,8 pies a 54,5 pies ya que también es evidente que la eficiencia se ve afectada disminuyendo significativamente cuando el diámetro es el menor, siendo requeridos los mismos 395 gpm.

En la curva característica b) se muestra un caso donde se aumenta el caudal requerido por el sistema manteniendo fijo el diámetro del impulsor de la bomba, se observa que para un caudal de 300 gpm la carga que puede manejar la bomba es 42 pies pero cuando son requeridos 400 gpm la carga admisible disminuye pero la eficiencia mejora, una solución para este caso si se desea mantener la misma carga inicial es preferible aumentar el diámetro del impulsor en la bomba.

### 3.9.1 USO DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE FUNCIONAMIENTO

Así como en el caso que se puede reducir el diámetro del impulsor también se puede hacer la modificación de las curvas variando la velocidad con que el sistema está operando, ya que lo que se consigue con este método es desplazar hacia arriba o hacia abajo las curvas de carga y eficiencia, esta variación es posible lograrla cambiando de motor o agregando al sistema un variador de frecuencia, este tendrá como propósito ajustar la velocidad del motor para mantener parámetros constantes.

En la figura 22 se representa las curvas de igual rendimiento en el diagrama Altura-Caudal para distintas velocidades de giro del rotor. Estos gráficos, por tanto, nos suministrarán información de velocidad rotación, caudal, altura y rendimiento.

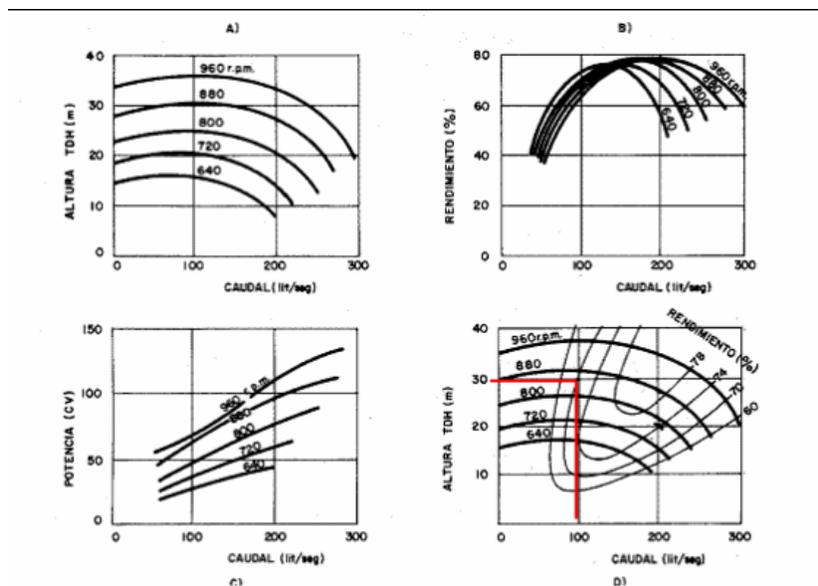


Figura 22 Curvas características a distintas velocidades de una misma bomba a) altura-caudal; B) rendimiento-Caudal; C) Potencia-Caudal; D) De igual rendimiento en el diagrama Altura-Caudal

El sistema se puede auto ajustar si y solo si, los parámetros de requerimiento son ajustado de forma que se aumente o disminuya la demanda, por ejemplo, si se reduce la demanda de agua, esto indicaría un aumento de presión en el sistema.

### 3.10 LEYES DE AFINIDAD

Cuando se requiere modificar la velocidad de funcionamiento del motor, o se hace un cambio en el diámetro del impulsor de la bomba para modificar el sistema, la bomba presenta características diferentes a las conocidas en los catálogos, es por ello que se hace necesario el uso de nuevos recursos para caracterizar el nuevo desempeño que tendrá nuestra bomba.

Las relaciones que permiten predecir el rendimiento de una bomba a una velocidad que no sea la de característica conocida de la bomba, son las leyes de afinidad, son dos los casos en los que se vuelven sumamente útiles y son las que se mencionaban con antelación, el cambio de diámetro del impulsor y la modificación de la velocidad de funcionamiento.

Es importante notar que para estas leyes están involucradas las variables de Caudal, Altura y Potencia (caballaje al freno).

- 1) La capacidad  $Q$  en cualquier punto dado en la característica de la bomba varía directamente con la velocidad,  $n$ .
- 2) La carga  $H$  varía en razón directa al cuadrado de la velocidad.
- 3) El caballaje al freno  $P$  varía en razón directa al cubo de la velocidad. En otras palabras, si se asigna el subíndice 1 a las condiciones en las cuales se conocen las características y el subíndice 2 denota las condiciones a alguna otra velocidad, entonces:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1}; \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2; \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \quad \text{Ecuación 40}$$

Estas relaciones se pueden utilizar sin peligro para cambios moderados en la velocidad, quizá no sean igual de exactas para cambios grandes en la velocidad, pero su aproximación es aceptable. Hay leyes de afinidad similares para los cambios en el diámetro  $D$  del impulsor, dentro de límites razonables de reducción del impulsor. En otras palabras:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{D_2}{D_1}; \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2; \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3 \quad \text{Ecuación 41}$$

El variador se ajusta mediante sensores de presión los cuales indican que la curva del sistema debe ser modificada para mantener los parámetros de eficiencia o de caudal.

En lugar de operar en una curva simple, una bomba controlada con un VFD opera en una infinidad de curvas que existen entre sus velocidades mínimas y máximas; 30 y 80 Hz, en el caso de un controlador de VFD. Esencialmente, cada vez que cambia la velocidad de la bomba, el punto de operación de la misma se encuentra en una curva diferente dentro de su rango de rendimiento. La figura 21 ilustra cómo funciona un VFD con la misma aplicación mencionada anteriormente. En lugar de que su ciclo funcione como en un sistema convencional, el VFD deberá operar la bomba a 2700 RPM aproximadamente, es así como se entrega una presión constante de 50 psi (600 pies CDT) con un gasto fijo de 5 gpm.

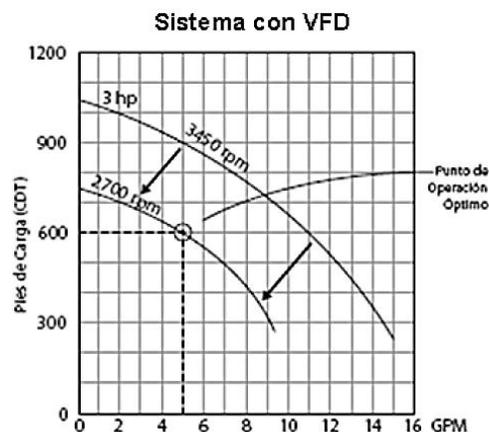


Figura 23 Curva de carga de un sistema de bombeo movido a un punto óptimo haciendo variar la velocidad.

### 3.11 CABEZAL DE DESCARGA

El cabezal de descarga sostiene el motor y el conjunto de tazón y también brinda una conexión de descarga (conexión de descarga tipo “NUF” que se ubicada en una de las secciones de tubería de columna debajo del cabezal de descarga). Ubicada en el cabezal de descarga hay una disposición de sellado de eje para sellar el eje donde sale de la cámara de líquido. El sello del eje será generalmente un sello mecánico.

#### 3.11.1 DISEÑO DEL CABEZAL PARA LAS BOMBAS VERTICALES.

- Tipo S: Cabezal vaciado muy estable, diseño de perfil bajo, especialmente apropiado para motores de flecha hueca. Tamaño de descarga de hasta 16 pulgadas para columna roscada o bridada.
- Tipo C: Cabezal vaciado, diseño rígido apropiado para flechas motrices huecas o sólidas. La base puede contar con montaje ANSI bridada. Descarga de hasta 12 pulgadas para columna roscada o brida
- Tipo F: Cabeza estructural, diseño rígido para flechas motrices huecas o sólidas. Disponible con base redonda, cuadrada o con brida ANSI. Tamaños de descarga de hasta 24 pulgadas para columna bridada.
- Tipo AB y BB: Cabezal estructural, diseño de codo segmentado de alta eficiencia. Diseños sobre pedidos para descarga sobre o por debajo de la base. Tamaños de descarga de hasta 72 pulgadas.

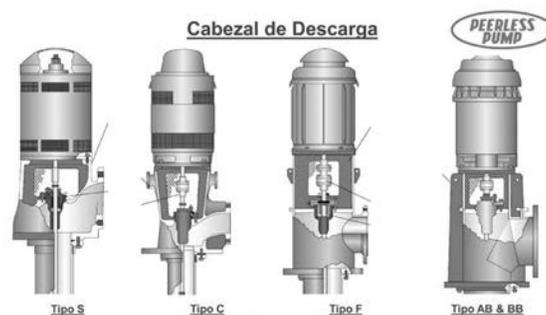


Figura 24 Diferentes tipos de cabezales de descarga.

## 4 ARRANCADORES PROGRESIVOS

Los arrancadores progresivos tienen un amplio uso en sistemas de bombeo, compresores, transportes horizontales, ventiladores y centrífugas.

Se deben utilizar cuando se requiera:

- Reducir los picos de corriente y eliminar las caídas de tensión en la línea,
- Reducir el par de arranque.
- Acelerar, desacelerar o frenar suavemente, para la seguridad de las personas u objetos transportados.
- Arrancar máquinas progresivamente, en especial aquellas de gran inercia.
- Adaptar fácilmente el arrancador a las máquinas especiales.
- Proteger al motor y a la máquina con un sistema de protección muy completo.

Existen muchos métodos de arranque en un motor, entre ellas están:

- Estrella-triángulo.
- Bobinado parcial.
- Autotransformador y
- Arrancadores de estado Sólido.

Todos estos arrancadores alimentan al motor a una frecuencia constante y por lo tanto debe limitar la corriente mediante el control de la tensión suministrada al motor.

Los arrancadores de estado sólido utilizan SCR para reducir la tensión. La tensión reducida al máximo, está limitada ya que el motor necesita suficiente voltaje para generar el par de aceleración.

Con la reducción máxima de tensión permitida, el motor absorberá dos a cuatro veces la carga total de amperios (FLA) por sus siglas en ingles durante el arranque.

#### **4.1 PRINCIPALES TIPOS DE VARIADORES DE VELOCIDAD**

Los variadores son convertidores de energía encargados de modular la energía eléctrica que recibe el motor. Los tipos de variadores más habituales son:

##### **4.1.1 RECTIFICADOR CONTROLADO**

Suministra corriente continua a partir de una red alterna monofásica o trifásica y controla el valor medio de la tensión.

La variación de dicha tensión se obtiene mediante la modificación del ángulo de retardo en el momento del cebado de los semiconductores de potencia.

Este tipo de variador se utiliza para alimentar motores de corriente continua, generalmente de excitación separada.

##### **4.1.2 CONVERTIDOR DE FRECUENCIA**

Suministra tensión alterna a partir de una red alterna monofásica o trifásica de frecuencia fija, con valor eficaz y frecuencia variables según una ley constante, se utiliza como variador de velocidad para motores asíncronos de jaula.

##### **4.1.3 REGULADOR DE TENSIÓN**

Suministra corriente alterna a partir de una red alterna monofásica o trifásica, con la misma frecuencia fija que la red y controlando el valor eficaz de la tensión. La variación de dicha tensión se obtiene mediante la modificación del ángulo de retardo en el momento del cebado de los semiconductores de potencia.

Generalmente, se utiliza como arrancador progresivo para motores asíncronos de jaula estándar, llamados Soft Starter, siempre que el par de arranque inicial no sea muy elevado.

##### **4.1.4 VARIADORES PARA MOTORES DE CC**

El variador CC tiene dos componentes: El convertidor y el regulador. Una vez que se obtiene la orientación del campo, el torque del motor CC se controla fácilmente variando la corriente de armadura y manteniendo la corriente de magnetización constante.

## 5 VARIADORES DE FRECUENCIA

Un variador de frecuencia (VFD, del inglés: Variable Frequency Drive, o bien AFD, Adjustable Frequency Drive), es una unidad que proporciona el control variable de la velocidad de motores de corriente alterna de tres fases, convirtiendo el voltaje y la frecuencia fijos de la red eléctrica en cantidades variables. Un variador de frecuencia es un caso especial de un variador de velocidad. Los variadores de frecuencia son también conocidos como drivers de frecuencia ajustable (AFD), drivers de CA, microdrivers o inversores.

Los dispositivos variadores de frecuencia operan bajo el principio de que la velocidad síncrona de un motor de corriente alterna (CA) está determinada por la frecuencia de AC suministrada y el número de polos en el estator, de acuerdo con la relación:

$$RPM = \frac{120 \times f}{P} \quad \text{Ecuación 42}$$

Dónde:

RPM = Revoluciones por minuto

f = frecuencia de suministro AC (Hercio)

p = Número de polos

Las cantidades de polos más frecuentemente utilizadas en motores síncronos o en Motor asíncrono son 2, 4, 6 y 8 polos.

### 5.1 DESCRIPCIÓN DE UN VFD

La conformación de estos dispositivos electrónicos a nivel de bloque se muestra en la imagen 24.

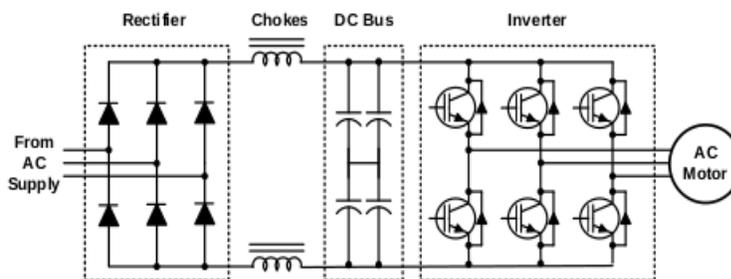


Figura 25 Diagrama del circuito principal de un Variador de Frecuencia [11]

Alimentación de CA: Viene de la red eléctrica (Normalmente 208V, 230V, 480V, 575V, 690V / 60Hz AC).

Rectificador: convierte (rectifica) a la red de alimentación de CA en Energía DC.

Inversor: utiliza la alimentación de CC del bus de CC para invertir a un resultado similar de onda sinusoidal y que sirve como alimentación de CA con una modulación de ancho de pulso técnica.

### 5.1.1 SEÑAL PWM

"modulación de ancho de pulso": explica cómo cada transición de la salida de tensión alterna es en realidad una serie de pulsos cortos de diferentes anchos. Al variar el ancho de los impulsos en cada medio ciclo, la potencia media producida tiene una salida sinusoidal similar. El número de transiciones de positivo a negativo por segundo determina la frecuencia real del motor.

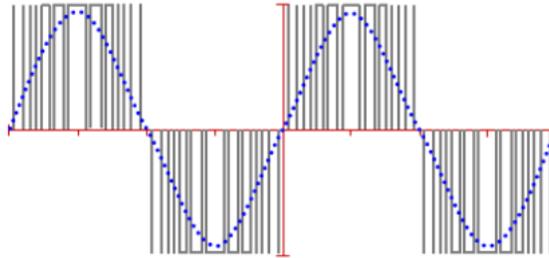


Figura 26 forma de onda de la señal modulada por ancho de pulso.

#### PWM ventajas:

- Excelente factor de potencia de entrada debido a la tensión del bus de CC fija.
- Eficiencia más altos: 92% a 96%.
- Menor costo inicial

#### PWM desventajas:

- Calentamiento del motor debido a bajas velocidades de funcionamiento y ruptura del aislamiento en algunas aplicaciones debido a la conmutación de alta frecuencia de los transistores.
- Funcionamiento no regenerativo.
- Armónicos de potencia del lado de la red (dependiendo de la aplicación y el tamaño de la unidad).

## 5.2 USO DE VFD'S

Estos dispositivos se deben utilizar donde:

- Se requiere un control de velocidad específica.
- El ahorro de energía es un objetivo.
- Se necesita un control personalizado.
- Los picos de corriente no pueden ser elevados.

### 5.2.1 FUNCIONES DE LOS VARIADORES DE VELOCIDAD.

Las principales funciones son:

- Arranque y regulación de velocidad, frenado de desaceleración y frenado de parada.
- Ahorro de energía.
- Regulador PI – PID (caudal, presión.).
- Recuperación automática con selección de velocidad.
- Velocidades preseleccionadas, marcha paso a paso.

## 5.2.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS VARIADORES DE VELOCIDAD.

Ventajas:

- No tienen elementos móviles, ni contactos, como en el caso de los contactores.
- Permite arranques suaves, sin transiciones o saltos.
- Posibilidad de ajustar en tiempo la rampa de aceleración del motor.
- Ahorrar energía cuando el motor funciona parcialmente cargado, con acción directa sobre el factor de potencia.
- Detectar y controlar la falta de fase a la entrada y salida del equipo.
- Mejor rendimiento del motor.
- El equipo no tiene limitación en cuanto al número de arranques, como sucede con la vida de los contactores.

Desventajas:

- Limitación de la corriente de arranque.
- Limitación en el par de arranque.

## 5.2.3 VFD COMO ARRANCADOR

Un VFD es un arrancador suave ideal, ya que ofrece una baja corriente Inrush de cualquier tipo de arrancador como se muestra en la Tabla X. A diferencia de los demás tipos de arrancadores, los VFD puede utilizar la frecuencia para limitar la potencia y la corriente entregada al motor.

El variador de frecuencia arranca el motor mediante la entrega de potencia a baja frecuencia, por lo que no requiere un alto consumo de corriente. La frecuencia aumenta gradualmente y ya que la velocidad del motor está íntimamente relacionada con ésta, es así que se varía hasta llegar a la velocidad deseada. El nivel de corriente del motor no supera nunca el amperaje a plena carga del motor en cualquier momento durante su arranque u operación. Además de los beneficios de ajustarse a bajas corrientes de arranque, los diseños de motor pueden ser ahora optimizados para una alta eficiencia.

### Control con variador de frecuencia

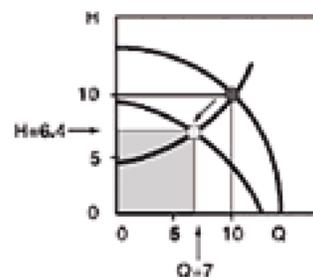


Figura 27 Control de bomba haciendo uso de variador de frecuencia.

**Tabla 6** Comparación de los diferentes tipos de arranque basado en la corriente de arranque de los motores.

| Starter Type             | Starting Current (% of FLA) |
|--------------------------|-----------------------------|
| VFD                      | 100%                        |
| Wye-Delta Starter        | 200-275%                    |
| Solid State Soft Starter | 200%                        |
| Autotransformer Starter  | 400-500%                    |
| Part Winding Starter     | 400-500%                    |
| Across the Line Starter  | 600-800%                    |

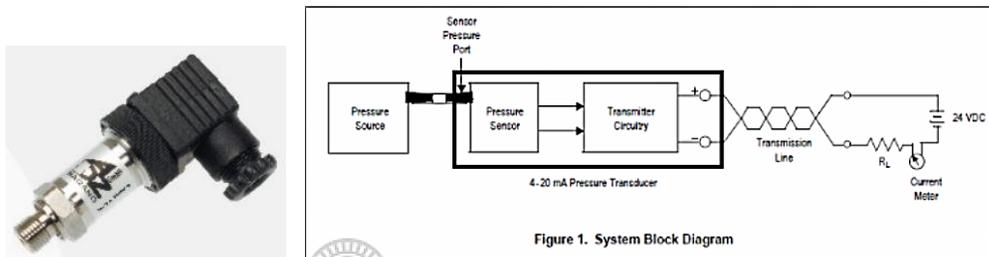
### 5.3 PARAMETROS DE SELECCIÓN DE VFD

Para poder decidir qué tipo de VFD que se implementará tenemos que tomar en cuenta los siguientes criterios, ya que existe una gran cantidad de dispositivos existentes en el mercado.

- Variables eléctricas, de tensión potencia y frecuencia de funcionamiento.
- Tipo de carga a controlar, ya sea de par constante cuadrático o inverso, potencia mecánica para un par inicial alto.
- Condiciones ambientales a las que estará sometido el equipo, humedad y temperatura. Instalación exterior o interior de una sala eléctrica.

## 6 SENSORES DE PRESION

Los sensores de presión son transductores que transforman un valor de presión en una señal eléctrica análoga, normalmente las unidades medidas cotidianamente son los PSI o los bar. Un tipo de sensor específico se caracteriza por su célula de medida de presión de cerámica. La deformación debida a la presión se transmite a las resistencias del puente de Wheatstone serigrafiado en la cerámica. La variación de resistencia es tratada posteriormente por la electrónica integrada para ofrecer una señal de salida analógica.



**Figura 28** Sensor de presión y esquema de funcionamiento

En la figura 27 se muestra el esquema de conexión de estos sensores de corriente y de voltaje.

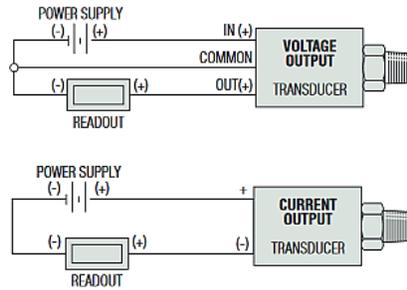


Figura 29 Sensores de presión de voltaje y corriente 3 y 2 hilos, esquema de conexión.

Debido a los diferentes rangos de presión en los que se requiere el uso de este tipo de dispositivos es importante determinar las características para poder hacer un buen uso de ellos, en la tabla se muestra las especificaciones para sensores de presión de la marca DPF Sensors.

Tabla 7 Especificaciones de sensores de presión para diferentes presiones.

| Specifications                                      |              |                                       |     |      |                          |   |  |
|---|--------------|---------------------------------------|-----|------|--------------------------|---|--|
| Pressure range                                      |              |                                       |     |      |                          |   |  |
| Measuring range*                                    | p [mbar]     | 10                                    | 16  | 20   | 25                       | 40  | 60 100                                 |
| Overload pressure                                   | p [mbar]     | 300                                   | 300 | 300  | 300                      | 300   | 300 300                                |
| Burst pressure                                      | p [mbar]     | 500                                   | 500 | 500  | 500                      | 500   | 500 500                                |
| Measuring range*                                    | p [mbar]     | 160                                   | 200 | 250  | 400                      | 600   | 1000                                   |
| Overload pressure                                   | p [mbar]     | 300                                   | 300 | 2000 | 2000                     | 2000  | 2000                                   |
| Burst pressure                                      | p [mbar]     | 500                                   | 500 | 3000 | 3000                     | 3000  | 3000                                   |
| Measuring range*                                    | p [bar]      | 1,6                                   | 2,0 | 2,5  | 4,0                      | 6,0   | 10,0                                   |
| Overload pressure                                   | p [bar]      | 6                                     | 6   | 6    | 10                       | 20  | 20                                     |
| Burst pressure                                      | p [bar]      | 9                                     | 9   | 9    | 15                       | 30  | 30                                     |
| Measuring range*                                    | p [bar]      | 16                                    | 20  | 25   | 40                       |   |  |
| Overload pressure                                   | p [bar]      | 40                                    | 40  | 100  | 100                      | (vacuum, relative pressure, + - or absolute pressure are available) |  |
| Burst pressure                                      | p [bar]      | 60                                    | 60  | 150  | 150                      |   |  |
| Electrical parameter                                | signal       |                                       |     |      | $U_s$ [V <sub>DC</sub> ] | $R_i$ [k $\Omega$ ]   | $R_A$ [ $\Omega$ ]                     |
| Output signal * and maximum acceptable burden $R_A$ | $R_A$ in Ohm | 4...20 mA (2-wire, 3-wire)            |     |      | 9...32                   | > 5,0   | acc. to $R_A = < (U_s - 10V) / 0,02 A$ |
|   |              | 0...10 V <sub>DC</sub> (3-wire)       |     |      | 12...32                  | > 1,0   |  |
|   |              | 1...5 V <sub>DC</sub>                 |     |      | 8...32                   | > 1,0   |  |
|   |              | 0,5...4,5 V <sub>DC</sub> ratiometric |     |      | 5 $\pm$ 10%              | > 4,7   |  |

<http://www.convertworld.com/es/presion/metro-de-agua.html>

Hay otros tipos de sensores de presión y algunos trabajan justo como un switch, accionados por la presión del sistema de agua estándar, también están equipados con un resorte para la posición de normalmente cerrado, y se abre por la presión del agua, abriendo el circuito, también son llamados presóstatos.

## 6.1 SENSORES DE PRESIÓN, SEÑAL DE CORRIENTE Y VOLTAJE

Los tipos de señal eléctrica estándar utilizadas para representar los cambios de presión son valores de mili amperios y voltios, los rangos pueden variar de 4 a 20 mA para la señal de corriente que uno de los rangos más utilizados en aplicaciones industriales y de 0 a 10 V, existen otros rangos en voltaje que van de 1 a 5 V por ejemplo además de otros valores, esto depende del tipo rango de presión que se mide y modelo del dispositivo.

Cuando se usan dispositivos de señal de corriente, su ventaja es que es inmune a las caídas de tensión que se pueden provocar debido a los tramos de conexión largos o al ruido de los motores, relés u otros equipos, en la imagen se muestra un diagrama del funcionamiento de un sensor de presión con señal de corriente.

Los sensores cumplen una relación lineal entre la presión y la señal analógica proporcionada, esto se ilustra en la gráfica de la imagen 28.

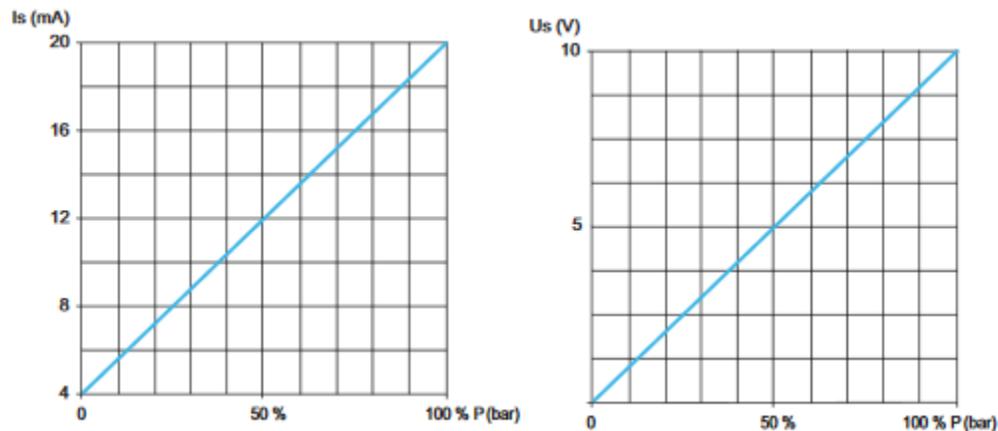


Figura 30 Relación entre la presión y la señal de corriente o voltaje de los sensores.

## CAPÍTULO 2

### Descripción de sistemas Fotovoltaicos

---

#### 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA ENERGÍA SOLAR.

##### 1.1 ENERGÍA SOLAR.

La energía solar es una forma de energía de origen renovable, se obtiene a partir del aprovechamiento de la radiación Electromagnética procedente del sol. Se puede considerar que es la fuente de casi toda la energía en nuestro planeta. Dependiendo de factores geográficos la intensidad de energía disponible que llega a los diferentes lugares del planeta puede variar, así como puede cambiar dependiendo del día, año, la hora, la latitud o de las condiciones atmosféricas. Además, la cantidad de energía que puede recogerse depende de la orientación del dispositivo receptor.

Según el Centro de Estudios en Medio Ambiente y Energías Renovables -CEMAER—cada año el sol arroja 4 mil veces más energía que la que consumimos, por lo que su potencial es prácticamente ilimitado. Actualmente la energía solar es una de las energías renovables más desarrolladas y usadas en todo el mundo.

Aunque no son las únicas, la energía solar se ocupa principalmente para calentar cosas como comida o agua, conocida como energía solar térmica, y también para generar electricidad, conocida como *energía solar fotovoltaica*. Los principales aparatos que se usan en la energía térmica son los calentadores de agua y las estufas solares, para generar la electricidad se usan las células solares, las cuales son el alma de lo que se conoce como paneles solares, estas son las encargadas de transformarla a energía eléctrica.

Es notable que dentro de las energías renovables que más se estén utilizando, la solar fotovoltaica sea la más importante hasta el momento, con inversiones en tecnología e instalaciones millonarias. Se construyen decenas de granjas solares alrededor del mundo para generar cientos de megawatts de electricidad, con las cuales se genera energía eléctrica a partir de energías verdes o limpias lo cual ayuda enormemente a combatir el calentamiento global.

Históricamente se conoce que el efecto fotovoltaico fue reconocido por primera vez por el físico francés Alexander-Edmond Becquerel en 1839, este efecto consiste en transformar la energía radiada por el sol en energía eléctrica mediante un semiconductor denominado celda fotovoltaica, fue hasta el año de 1849 en el Reino Unido que se utilizó por primera vez el término fotovoltaico proviene del griego phos que significa luz y de voltaico, en honor al físico italiano Alejandro Volta. En 1883 Charles Fritts fabricó la primera celda fotovoltaica recubriendo una muestra de selenio semiconductor con pan de oro para formar la unión, logrando una eficiencia del 1% demostrando de forma práctica que era posible producir electricidad con la luz solar.

La energía fotovoltaica es una fuente de energía más elegante, la luz brilla en un cristal y produce electricidad, es tan simple como eso. La fuente de energía (sol) es muy abundante, gratis y ampliamente distribuida, disponible para todos los países y las personas del mundo. El recurso solar utilizado actualmente a nivel mundial es del 0.01% del recurso solar total estimado y el uso proyectado a futuro será del 0.04% del recurso solar total. Las muchas ventajas de la energía fotovoltaica se prestan a ser la fuente de energía final.

## **1.2 EL SOL.**

Como se ha mencionado el Sol es nuestra principal fuente de energía inagotable (se estima que tiene combustible para 5,000 millones de años más), que se manifiesta, sobre todo, en forma de luz y calor. Está a 150 millones de kilómetros de la Tierra y contiene más del 99,8% de toda la materia del Sistema Solar. [4]

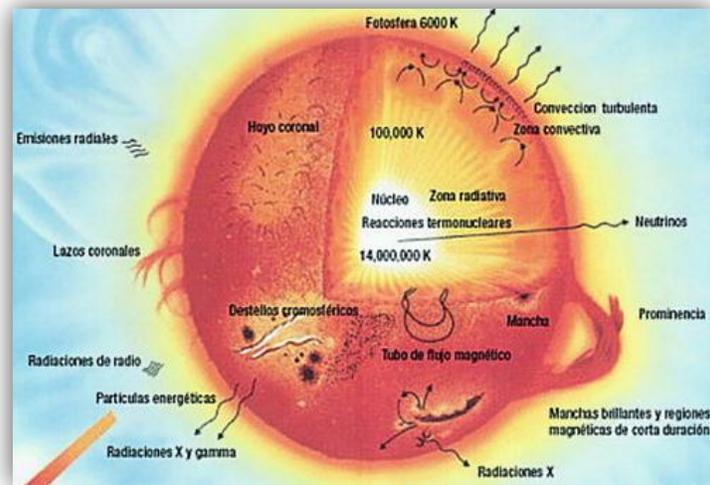


Figura 31 El Sol y su núcleo.

Tabla 8 Algunos datos básicos acerca del sol

| Datos básicos  |                                    |
|--|------------------------------------|
| <b>Diámetro</b>  | 1,400,000 Km                       |
| <b>Tamaño: radio ecuatorial</b>                            | 695,000 Km                         |
| <b>Masa</b>  | 300,000 veces la masa de la tierra |
| <b>Temperatura superficial</b>                             | 6,000 °C                           |
| <b>Vida estimada</b>                                       | 5,000 millones de años             |
| <b>Distancia a la tierra</b>                               | 150 millones de Km                 |
| <b>Tiempo que tarda la luz solar en llegar a la tierra</b> | 8 min                              |

La generación de energía proviene de la pérdida de masa del Sol, y esta se convierte en energía de acuerdo con la famosa ecuación de Einstein,  $E=m*c^2$ , donde "E" es la cantidad de energía liberada cuando desaparece la masa "m" y "c" es la velocidad de la luz en el vacío.

Su flujo radiante es de  $3.8 \times 10^{26}$  W equivalente a una densidad de 62.5 MW por cada metro cuadrado de superficie solar. De toda esta solo una pequeña parte llamada constante solar e igual a 1.37 KW por metro cuadrado aproximadamente, llega a la superficie de la tierra, como consecuencia de la distancia que los separa. La radiación que llega varía de forma aleatoria debido a muy diversos efectos que provoca sobre ella la atmósfera terrestre. Una gran parte es absorbida y dispersa por los propios agentes variables que allí se encuentran, tales como la polución y la nubosidad. [6]

### 1.3 LA TIERRA.

La Tierra, nuestro planeta, es una maravillosa bola azul y blanca cuando se ve desde el espacio. Es el tercer planeta desde el Sol, la Tierra es el único planeta que sabe que tiene vida y agua líquida en su superficie. Tiene una atmósfera substancial y un campo magnético, los que son críticos para que exista vida en ella. Nuestro planeta es el más cercano al Sol con un satélite natural – nuestra Luna. La Tierra es un planeta rocoso, su capa de gases llamada atmosfera dispersa la luz y absorbe

calor, evitando que la Tierra se caliente demasiado de día y se enfríe durante la noche. El 70% de la superficie terrestre está cubierta de agua. En los polos, que reciben poca energía solar, el agua se hiela y forma los casquetes polares. El polo sur es más grande y concentra mayor reserva de agua dulce. [7]

#### 1.4 MOVIMIENTOS DE LA TIERRA.

La Tierra está en continuo movimiento. Se desplaza, con el resto de planetas y cuerpos del Sistema Solar, girando alrededor del centro de nuestra galaxia, la Vía Láctea. Sin embargo, este movimiento afecta poco nuestra vida cotidiana.

##### 1.4.1 EL MOVIMIENTO DE TRASLACIÓN: EL AÑO.

Por el movimiento de traslación la Tierra se mueve alrededor del Sol, en 365 días, 5 horas y 57 minutos, equivalente a 365,2422 días, que es la duración del año. Describe una trayectoria elíptica de 930 millones de kilómetros, a una distancia media del Sol de 150 millones de kilómetros. El Sol se encuentra en uno de los focos de la elipse. La distancia media Sol-Tierra es 1 U.A. (Unidad Astronómica), que equivale a 149.675.000 km. [8]

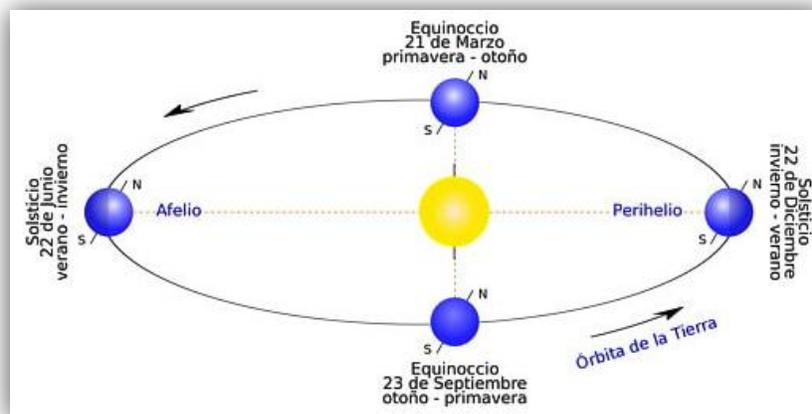


Figura 32 El movimiento de traslación de la Tierra.

##### 1.4.2 EL MOVIMIENTO DE ROTACIÓN: EL DÍA.

Aproximadamente cada 24 horas (23 h 56 minutos), la Tierra da una vuelta completa alrededor de un eje ideal que pasa por los polos. Gira en dirección Oeste-Este, en sentido directo (contrario al de las agujas del reloj), produciendo la impresión de que es el cielo el que gira alrededor de nuestro planeta, es a este movimiento, denominado rotación, que se debe la sucesión de días y noches. [8]



**Figura 33** El movimiento de rotación de la Tierra.

### 1.4.3 EL MOVIMIENTO DE PRECESIÓN.

La Tierra es un elipsoide de forma irregular, aplastado por los polos y deformado por la atracción gravitacional del Sol, la Luna y, en menor medida, de los planetas. Esto provoca una especie de lentísimo balanceo en la Tierra durante su movimiento de traslación llamado "precesión de los equinoccios", que se efectúa en sentido inverso al de rotación, es decir en sentido retrógrado (sentido de las agujas del reloj). Bajo la influencia de dichas atracciones, el eje va describiendo un doble cono de  $47^\circ$  de abertura, cuyo vértice está en el centro de la Tierra. [8]

### 1.4.4 EL MOVIMIENTO NUTACIÓN.

Este movimiento se superpone con la precesión y consiste en un pequeño vaivén del eje de la Tierra. Como la Tierra no es esférica, la atracción de la Luna sobre el abultamiento ecuatorial de nuestro planeta provoca el movimiento de nutación.

Para hacernos una idea de este movimiento, imaginemos que, mientras el eje de rotación describe el movimiento cónico de precesión, recorre a su vez una pequeña elipse o bucle en un periodo de 18,6 años. En una vuelta completa de precesión (25.767 años) la Tierra realiza más de 1.300 bucles de nutación. [8]

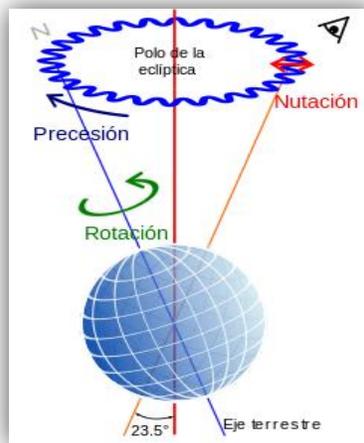


Figura 34 El movimiento de precesión y nutación de la Tierra.

#### 1.4.5 BAMBOLEO DE CHANDLER.

Es el quinto de los movimientos de la Tierra, y es una pequeña oscilación del eje de rotación terrestre descubierta en 1891, y que supone añadir 0,7 segundos de arco en un periodo de 433 días a la precesión de los equinoccios. Dicho de otro modo, los polos geográficos terrestres se mueven en una circunferencia irregular de tres a 15 metros de diámetro, describiendo un movimiento oscilatorio.

#### 1.5 LA ECLÍPTICA

Durante el movimiento de traslación, la Tierra genera un plano al completar su trayectoria al que se le conoce con el nombre de Eclíptica, debido a la inclinación promedio que posee el eje de giro de la Tierra de  $23^{\circ} 27'$ , el Ecuador terrestre y la eclíptica forma entre sí el mismo ángulo.

La Tierra siempre mantiene su inclinación en la misma dirección a lo largo de su viaje alrededor del sol, lo que provoca las estaciones climáticas, producto de la diferente incidencia de los rayos solares sobre la superficie terrestre.

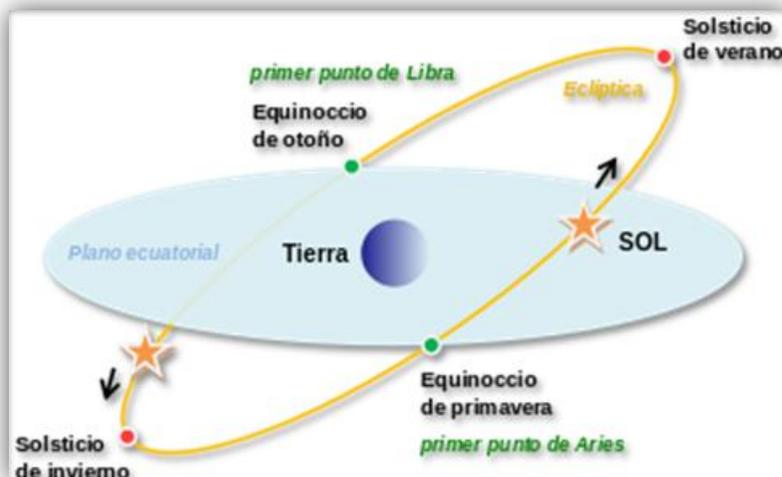


Figura 35 Figura del plano ecuatorial y la eclíptica.

Se puede decir que visto desde la Tierra la eclíptica es el círculo máximo que a lo largo del año traza el sol, al ángulo que se forma entre el plano eclíptico y el plano del ecuatorial terrestre se le llama oblicuidad de la eclíptica.

### 1.5.1 DECLINACIÓN SOLAR.

Se le conoce declinación solar al ángulo formado entre el plano ecuatorial terrestre y la posición del sol en el plano de la eclíptica, dicho de otra forma, es el ángulo que forman los rayos solares y el plano ecuatorial terrestre, este ángulo está cambiando constantemente entre  $+23.45^\circ$  y  $-23.45^\circ$ .

El ángulo es positivo cuando el Sol está por encima del ecuador y negativo cuando el Sol está por debajo del ecuador.

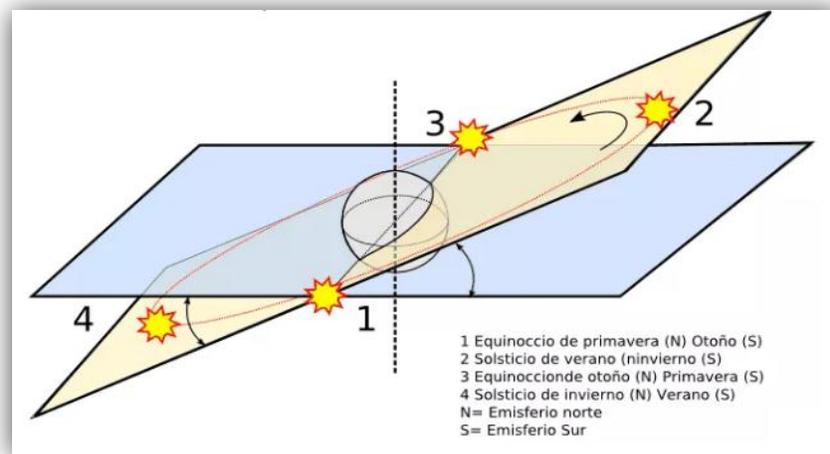


Figura 36 Movimiento aparente del Sol visto desde el Ecuador de la Tierra.

### 1.5.2 COORDENADAS SOLARES

Visto desde la Tierra el sol se mueve constantemente y para definir su posición a cada instante se utilizan coordenadas polares, el origen de este sistema está situado en la posición del receptor, el plano tangente a la superficie terrestre es el horizontal, la perpendicular a este plano en dirección a la semiesfera azul de la figura 7, define la posición del **ZENIT** del lugar, en la dirección opuesta, a través de la tierra está el **NADIR**.

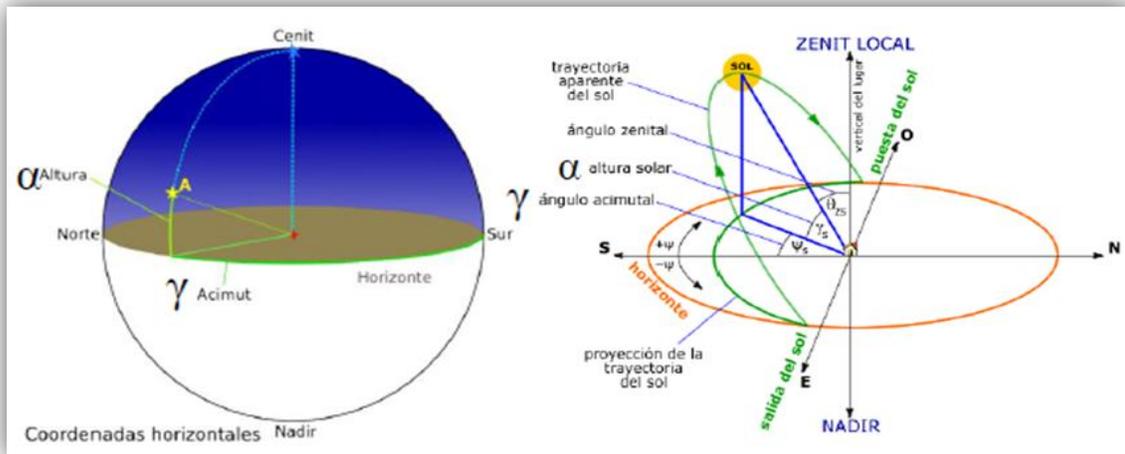


Figura 37 Parámetros y ángulos de las coordenadas solares.

Como se puede observar en la figura 7, la posición del sol se define mediante los siguientes parámetros:

- Latitud y Meridiano del lugar, que se encuentran ya definidos.
- Distancia Zenital, es el ángulo zenital que se forma por el radio vector Sol-Tierra y la vertical del lugar. A partir del zenit es positivo.
- Altura solar, ángulo que forman los rayos solares sobre la superficie horizontal, este es complementario de la distancia zenital.
- Angulo Acimutal, es el que se forma por la proyección del Sol sobre el plano del horizonte con la dirección Sur, positivo  $0^\circ$  a  $180^\circ$  hacia el Oeste y negativo hacia el Este  $0^\circ$  a  $-180^\circ$ .
- Horizonte, este es el lugar geométrico de los puntos con altura 0.

## 1.6 RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar es el flujo de energía que recibimos del sol en forma de ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias (luz visible, infrarroja y ultravioleta). La luz visible son las radiaciones comprendidas entre  $0,4 \mu\text{m}$  y  $0,7 \mu\text{m}$  pueden ser detectadas por el ojo humano. La radiación solar se mide normalmente con un instrumento denominado piranómetro. En función de cómo reciben la radiación solar los objetos situados en la superficie terrestre, se pueden distinguir estos tipos de radiaciones.

### 1.6.1 TIPOS DE RADIACIONES.

**Radiación directa:** llega directamente del sol sin haber sufrido cambio alguno en su dirección. Se caracteriza por proyectar una sombra definida de los objetos opacos que la interceptan.

**Radiación Difusa:** Parte de la radiación que atraviesa la atmósfera es reflejada por las nubes o absorbida por éstas. Esta radiación se denomina difusa, va en todas las direcciones, como consecuencia de las reflexiones y absorciones, no solo de las nubes sino de las partículas de polvo atmosférico, montañas, etc. Este tipo de radiación se caracteriza por no producir sombra alguna respecto a los objetos opacos interpuestos.

Radiación Reflejada: Es aquella reflejada por la superficie terrestre. La cantidad de radiación depende del coeficiente de reflexión de la superficie. Las superficies verticales son las que más radiación reflejada reciben.

Radiación global: Es la radiación total, suma de las tres radiaciones.

### 1.6.2 IRRADIACIÓN E IRRADIANCIA SOLAR.

No se deben confundir los términos irradiación e irradiancia solar, estos términos aunque muy parecidos determinan diferentes fenómenos, la irradiación solar es la energía por unidad de superficie a lo largo de un tiempo, esta se representa en Julios por metro cuadrado ( $J/m^2$ ), aunque también se expresa en ( $W.h/m^2$ ), mientras tanto la irradiancia es la cantidad de energía que se capta en un área, es decir, la cantidad de radiación solar que cae en una superficie terrestre la cual se considera el dato de un kilovatio por metro cuadrado ( $kW/m^2$ ) para un valor de constante solar.

### 1.6.3 HORA SOL PICO.

Podríamos definir la Hora Sol Pico (HSP), como una unidad encargada de medir la irradiación solar y definirla como el tiempo (en horas) de una hipotética irradiancia solar constante de  $1.000 W/m^2$ . Dicho de otra forma, es el número equivalente de horas por día de promedio de irradiancia cerca o igual a  $1,000 W/m^2$  (a pleno sol).

Al presentar gráficamente toda la distribución de la irradiación incidente sobre la superficie terrestre durante un día dividido en horas, se puede observar que a lo largo del día los niveles de irradiación varían, de esta forma se puede interpretar la hora sol pico como una función de valor constante que delimita la misma área que la distribución antes mencionada.

Por otra parte, en términos de energía fotovoltaica, la potencia de los paneles fotovoltaicos se especifica en watt pico (Wp), lo cual representa la potencia eléctrica que entrega el panel, cuando la irradiancia sobre él es de  $1,000 W/m^2$  (estándar o norma de certificación) con un espectro o composición similar a la radiación solar, y con una temperatura de  $25 ^\circ C$ .

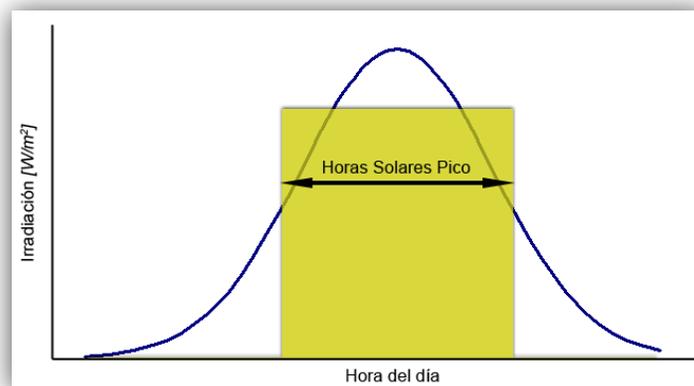


Figura 38 Representación gráfica de la Hora Sol Pico.

## 1.7 EFECTO FOTOVOLTAICO.

La luz solar está compuesta por diferentes tipos de partículas llamadas fotones, los cuales están compuestos por diferentes tipos de energía, desde la luz ultravioleta, luz visible, luz infrarroja, rayos gamma y rayos x, por su parte, el silicio es un elemento semiconductor que se encuentra en abundancia en la arena de la tierra, el silicio puro tiene características aislantes a baja temperatura y conductoras cuando reciben mucha energía, este silicio por un lado se dopará con fósforo para obtener material de carga negativa (Capa N), y por el otro lado, se dopará con boro para obtener material de carga positiva (Capa P). Estas 2 capas se mantendrán separadas por una fina junta para que se mantengan como capas neutras formando una célula solar con una unión PN.

El efecto fotovoltaico se produce al incidir la radiación solar (fotones) sobre el material N. En un panel solar la célula de silicio transforma la luz del sol en energía eléctrica, debido a que la energía que recibe de los fotones provoca un movimiento caótico de electrones en el interior del material, rompiendo enlaces, algunos de estos electrones atraviesan la barrera de potencial siendo expulsados fuera del semiconductor al circuito externo, la unión de muchas células producirá mucha más energía, y un grupo de paneles puede producir la electricidad suficiente para cubrir los consumos diarios de una vivienda habitual.

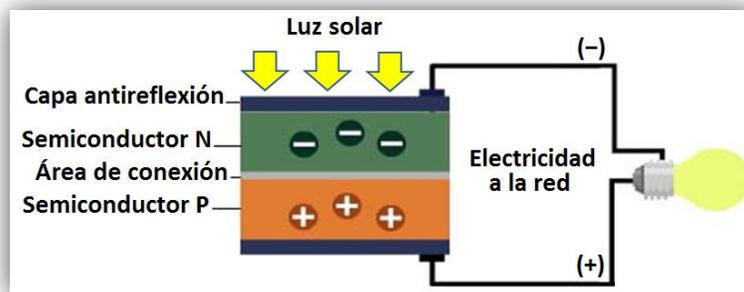


Figura 39 Efecto fotovoltaico en una célula solar.

## 1.8 CELULA SOLAR FOTOVOLTAICA.

Una célula solar fotovoltaica es un dispositivo que convierte la energía solar en energía eléctrica, en el mercado actual estas células o celdas fotovoltaicas están hechas de material semiconductor generalmente de silicio, correctamente tratado. Este tratamiento se caracteriza por procesos químicos, entre los que están los así llamados "dopados".

Insertando en la estructura cristalina del silicio impurezas, es decir átomos de boro y fósforo, se genera un campo eléctrico y también se ponen a disposición las cargas necesarias a la formación de la corriente eléctrica. Ésta se crea cuando la célula, cuyas dos caras están conectadas a un aparato eléctrico, está expuesta a la luz. Al conjunto de células fotovoltaicas conectadas entre sí se le llama Panel solar.



**Figura 40** Célula fotovoltaica.

Una típica célula fotovoltaica tiene un espesor total de entre 0,25 y 0,35 mm. Generalmente es de forma cuadrada, tiene una superficie comprendida entre 100 y 225 m<sup>2</sup> y produce, con una radiación de 1 kW/m<sup>2</sup> a una temperatura de 25°C, una corriente comprendida entre 3 y 4 A, una tensión de aproximadamente 0,5 V y una potencia correspondiente de 1,5 - 2 Wp.

### **1.8.1 EL VATIO PICO.**

Como la potencia de una célula fotovoltaica varía cuando cambia su temperatura y su radiación, se tiene una comparación establecida para condiciones estándar de referencia, que dan origen al así llamado vatio pico (Wp), relativo a la potencia producida por la célula a la temperatura de 25°C bajo una radiación de 1.000 W/m<sup>2</sup>.

### **1.8.2 TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS.**

Las células fotovoltaicas las podemos encontrar de 3 tipos:

- Mono-componente.
- Poli-componente.
- Mezclas Poliméricas.

#### **1.8.2.1 CÉLULA MONO-COMPONENTE.**

En las células mono-componente solo se utiliza un tipo de material semiconductor, como ya mencionamos en la gran mayoría se utiliza el silicio, debido a su abundancia, a su costo y a su buen rendimiento.

Las células fotovoltaicas de silicio las podemos encontrar en tres formas:

- Mono-cristalino.
- Poli-cristalino.
- Amorfo

### 1.8.2.2 CÉLULA POLI-COMPONENTE.

En este tipo de células se utilizan dos o tres elementos semiconductores, por ejemplo: GaAs (Arseniuro de Galio), InP (Fosfuro de Indio), CdTe (Teluro de Cadmio), etc.

Entre las características principales de este tipo de células es su mayor rendimiento con respecto al silicio, contiene buenas propiedades físicas, tiene muy alta pureza y entre sus desventajas es su alto costo, procesos industriales complejos para obtenerlo.

### 1.8.2.3 MEZCLAS POLIMÉRICAS.

Como su nombre lo dice se utiliza una mezcla de polímeros para constituir la celda fotovoltaica.

Entre las características de los polímeros están su buen comportamiento para este tipo de aplicaciones, se basan en uniones metal-semiconductores y sus principales desventajas son su alto costo y son poco desarrollados en su estudio.

**Tabla 9** Rendimiento, características y fabricación de las células de silicio.

| CÉLULAS        | RENDIMIENTO LABORATORIO | RENDIMIENTO DIRECTO | CARACTERÍSTICAS   | FABRICACIÓN  |
|----------------|-------------------------|---------------------|---|--|
| MONOCRISTALINO | 24 %                    | 15 – 18 %           | Es típico los azules homogéneos y la conexión de las células individuales entre sí.   | Se obtiene de silicio puro fundido y dopado con boro.  |
| POLICRISTALINO | 19 – 20 %               | 12 – 14 %           | La superficie está estructurada en cristales y contiene distintos tonos azules.       | Igual que el del mono-cristalino, pero se disminuye el número de fases de cristalización.              |
| AMORFO         | 16 %                    | < 10 %              | Tiene un color homogéneo (marrón), pero no existe conexión visible entre las células. | Tiene la ventaja de depositarse en forma de lámina delgada y sobre un sustrato como vidrio o plástico. |

## 1.9 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.

Debido a que las celdas fotovoltaicas producen individualmente una baja tensión, se deben combinar varias celdas en módulos fotovoltaicos, los cuales a su vez deben ser conectados entre ellos para formar un generador fotovoltaico de tamaño adecuado generando una tensión más adecuada para su uso. La electricidad generada se puede almacenar, usar directamente, conectarla al sistema eléctrico o combinar las opciones anteriores.

Es así que un sistema fotovoltaico es un conjunto de dispositivos que aprovechan la energía producida por el sol procesándola y convirtiéndola en energía eléctrica. La generación de energía eléctrica dependerá de las horas que el sol brille incidiendo sobre los paneles, del tipo, la conexión, orientación, potencia nominal y cantidad de los paneles instalados.

### **1.9.1 TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.**

Por su forma de conexión y dispositivos existen tres tipos de sistemas fotovoltaicos, los cuales son:

- Sistemas aislados (con o sin baterías).
- Sistemas conectados a la red.
- Sistemas híbridos.

#### **1.9.1.1 SISTEMAS AISLADOS.**

Un sistema aislado satisface total o parcialmente la demanda de energía eléctrica, se instalan generalmente en aquellos lugares donde no existe la red de distribución eléctrica o en lugares de difícil acceso. Estos sistemas normalmente están equipados para guardar y acumular energía, ya que solo se puede aprovechar la luz del día, es por eso que para solventar la demanda diurna y nocturna el campo fotovoltaico se dimensiona de forma que permita, durante el día, la alimentación de la carga y la recarga de los acumuladores de energía.

Para los sistemas aislados los principales componentes son:

- Módulos fotovoltaicos.
- Reguladores de carga.
- Acumuladores de energía (baterías).
- Inversor tipo aislado.
- Elementos de protección.

#### **1.9.1.2 SISTEMAS CONECTADOS A LA RED.**

Las principales características de los llamados sistemas conectados a la red son, que estos no tienen acumuladores de energía, ya que toda la energía producida durante las horas de insolación se canaliza a la red eléctrica. Es por eso que estas instalaciones cuentan con sistemas de seguimiento de la tensión de la red de distribución, con esto se garantiza que el sistema obtenga un correcto funcionamiento. Por otra parte, al no contar con acumuladores la instalación se vuelve mucho más económica y menos compleja.

Los principales componentes de los sistemas conectados a la red son:

- Módulos fotovoltaicos.
- Inversor con conexión a red.
- Elementos de protección.
- Contador bidireccional.

#### **1.9.1.3 SISTEMAS HÍBRIDOS.**

En muchos casos los sistemas fotovoltaicos aislados se pueden complementar con otros sistemas energéticos, a fin de garantizar confiabilidad y mayores garantías de disposición de electricidad.

Cuando un sistema fotovoltaico además de su generador incorpora otro generador de energía se le denomina sistema híbrido, también a la combinación de sistemas aislados y de sistemas conectados a la red, uno de los ejemplos más comunes es el de incorporar sistemas de energía eólica, estas combinaciones se dan para aprovechar los distintos recursos energéticos para tener mayor fiabilidad en el suministro de energía, normalmente todas las generaciones de energía son compatibles.

### 1.9.2 COMPONENTES BÁSICOS DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.

Un sistema de energía fotovoltaica está formado por diversos componentes básicos, dependiendo del tipo de sistema a continuación se mencionan los más comunes:

- **Generador o Módulo fotovoltaico.** Parte importante y esencial de estos sistemas son los generadores o módulos fotovoltaicos, estos se encargan de captar la radiación solar y convertirla en energía eléctrica por medio del efecto fotovoltaico. En todos las fichas técnicas de los paneles fotovoltaicos, debe (o debería) aparecer las características eléctricas del panel ( $P_{max}$ ,  $U_{oc}$ ,  $U_{mpp}$ ,  $I_{sc}$  y  $I_{mpp}$ ) en unas condiciones de medida estandarizadas conocidas como STC (del inglés Standard Test Conditions) o condiciones de prueba estándar.
- **Batería o acumulador.** Como se ha mencionado algunos de los sistemas de energía solar utilizan acumuladores de energía, estos acumuladores o baterías son especiales para este tipo de sistemas, se utilizan baterías de ácido de ciclo profundo las cuales almacenan energía eléctrica producida por el generador fotovoltaico mediante una reacción electroquímica, para poder utilizarla en periodos en los que la demanda exceda la capacidad de producción del generador y en días completamente nublados o por la noche. Este tipo de baterías duran más y son más costosas, con la elección adecuada del tamaño en cuanto a la capacidad de la batería en un sistema fotovoltaico se puede obtener una duración de hasta 15 años.
- **Controlador de carga.** En sistemas donde se trabaja con baterías, los controladores o reguladores de carga son necesarios para protegerlas a estas frente a sobrecargas y descargas profundas. Este regulador de tensión debe controlar constantemente el estado de carga de las baterías y regula la intensidad de carga de las mismas para sus ciclos de vida.
- **Inversor fotovoltaico.** El inversor solar o fotovoltaico es un tipo de inversor eléctrico que está fabricado especialmente para convertir la corriente continua de los paneles solares en corriente alterna, estos inversores según el tipo de sistema fotovoltaico los hay de estos tipos:
  - ✓ Inversores Aislados.
  - ✓ -Onda Pura.
  - ✓ -Onda Modificada.
  - ✓ Inversores Interconectados.
  - ✓ -Micro-inversor.
  - ✓ -Inversores Centrales.
  - ✓ Inversor Híbrido.
- **Elementos de protección.** Son elementos indispensables diseñados para proteger tanto a las personas como también toda la instalación fotovoltaica en caso de fallas eléctricas o situaciones de sobrecarga, dentro de estos elementos se encuentran los interruptores de desconexión, protector de sobretensiones, etc.

# CAPÍTULO 3

Elección de equipo necesario para propuesta de diseño de banco de pruebas con equipo de bombeo implementando una alimentación fotovoltaica híbrida.

## 1 SELECCIÓN DE BOMBA

En función de la importancia de una aplicación de un equipo de bombeo, la columna y la capacidad tienen quizás la misma categoría. Aun cuando hay otros factores como el líquido que se maneja, disposición de la tubería y tipo de motor, que también son importantes; el requisito principal de una bomba es el de entregar la cantidad correcta de líquido contra la columna existente en el sistema.

### 1.10 CURVA DE LA BOMBA SELECCIONADA

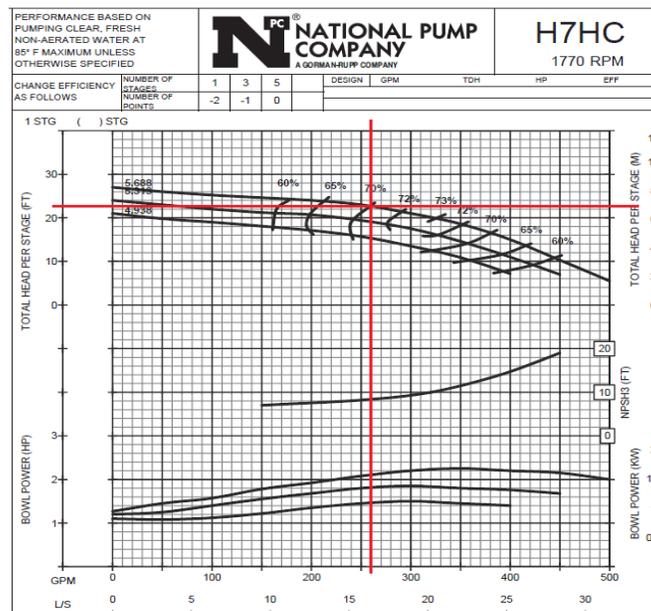


Figura 41 Curva de funcionamiento de la bomba elegida [16]

### 1.11 CALCULO DE LOS HP

$$BHP = \frac{E_{tapas} \times H \times Q \times S_T \times G_T}{3960 \times Eff}$$

Ecuación 43

Dónde:

H: Carga dinámica en pies de la Bomba

Q: Caudal a manejar  
 S<sub>G</sub>: Gravedad específica de líquido  
 Eff: Eficiencia de la bomba

$$BHP = \frac{2 \times 22 \times 260 \times 1}{3960 \times 0.70}$$

$$BHP = 4.13$$

$$HP_{Entrada} = \frac{BHP}{Eff_m}$$

Ecuación 44

$$HP_{Entrada} = \frac{4.13}{0.90}$$

$$HP_{Entrada} = 4.59$$

$$kW_{Entrada} = 4.59 \times 0.746$$

$$kW_{Entrada} = 3.42$$

## 1.12 DIMENSIONAMIENTO DE LA BOMBA

Tabla 10 Características de la bomba elegida.

|            |                       |
|------------|-----------------------|
| Marca      | National Pump Company |
| Modelo     | H7HC                  |
| Velocidad  | 1770 RPM              |
| Caudal Q   | 260 GPM               |
| Carga H    | 22 pies               |
| Etapas     | 2                     |
| Eficiencia | 70%                   |

## 2 SELECCIÓN DE MOTOR

Los motores eléctricos utilizados para bombeo, son generalmente unidades de jaula de ardilla y de arranque a voltaje pleno, aunque también se usan algunos motores de cd. También se usan motores de rotor devanado y síncronos. Los desarrollos más recientes en motores sellados y de entrehierro axial, así como bombas electromagnéticas, están ejerciendo notable influencia en el diseño tanta de bombas grandes como pequeñas

Los motores de inducción de rotor devanado ofrecen cuatro ventajas:

- Control de velocidad con variaciones de velocidad hasta del 50 por ciento de la plena, a 40 por ciento del caballaje nominal,
- Alto par de arranque con bajos KVA en cargas pesadas;
- Alta disipación de calor en el reóstato de un arranque, que permite grandes pérdidas por deslizamiento durante el arranque sin que el motor peligre;
- Cargas de tipo amortiguada por la operación de alto deslizamiento, lo que da un efecto de volante muy deseable en las cargas pico.

## 2.1 PROPUESTA DE DIFERENTES TIPOS DE MOTOR

En el mercado existe una variedad inmensa de motores con características específicas dado que en sistemas de bombeo donde se requiere el uso de variadores de frecuencia para mejorar la eficiencia en cuanto a consumo energético según la norma NEMA MG1-parte 31, los motores adecuados para este propósito son los llamados Inverter Duty Motor, de los cuales es que se ha investigado en el proceso de este documento, encontrando así lo que son las siguientes hojas de datos de marcas y características que se acoplan a nuestras necesidades.

**Tabla 11** Datos de diferentes tipos de motores para propuesta.

| Características<br>Modelo-marca | Potencia del motor (placa) [HP] | RPM  | Voltaje [V] | Eficiencia [%] | FLA | OBSERVACIÓN                       |
|---------------------------------|---------------------------------|------|-------------|----------------|-----|-----------------------------------|
| V3616 (GE)                      | 5                               | 1800 | 230/460     | 87.5           | 6.4 | vertical de eje hueco (inverter)  |
| VHM3218T(ABB)                   | 5                               | 1800 | 208-230/460 | 87.5           | 6.9 | Vertical de eje solido (inverter) |
| V834 (GE)                       | 5                               | 1800 | 230/460     | 89.5           | 6.4 | Vertical de eje solido (inverter) |

### 2.1.1 PROPUESTA ESPECIFICA DE MOTOR

Motor vertical de eje hueco de 5 HP, inverter Duty Marca: General Electric

**Vertical**  
 Value Line™ Vertical Hollow Shaft  
 High Efficiency  
 Weather Protection I  
 Ball Style Non-Reverse Ratchet



Pricing

Volts: 230/460, 460  
 HP: 5-500

\*Motor coupling is required and priced separately on page 7.5. V850, V851 and V852 motor coupling on page 7.6.

| HP  | RPM  | Volts   | Frame    | FLA @ 460 | NEMA Code | Thrust Down | LRA | Nom. Eff. | Cat. No. | Motor List Price | Coupling List Price* | Price Symbol | Norm. Stk | WL (lbs) | CD Dim. (in) | AG Dim. (in) | Notes  |
|-----|------|---------|----------|-----------|-----------|-------------|-----|-----------|----------|------------------|----------------------|--------------|-----------|----------|--------------|--------------|--------|
| 5   | 3600 | 230/460 | L213TP10 | 6.2       | J         | 1900        | 39  | 85.5      | V3109    | \$1,512          | \$168                | G5-7VH5B     | Y         | 220      | 20.25        | 24.62        | 111    |
| 5   | 1800 | 230/460 | L213TP10 | 6.4       | J         | 2400        | 41  | 87.5      | V3616    | \$1,497          | \$168                | G5-7VH5B     | Y         | 220      | 20.25        | 24.62        | 51,111 |
| 7.5 | 3600 | 230/460 | L213TP10 | 9.2       | J         | 1900        | 70  | 87.5      | V3108    | \$1,629          | \$168                | G5-7VH5B     | Y         | 220      | 20.25        | 24.62        | 6,111  |
| 7.5 | 1800 | 230/460 | L213TP10 | 9.5       | H         | 2400        | 61  | 88.5      | V3615    | \$1,545          | \$168                | G5-7VH5B     | Y         | 220      | 20.25        | 24.62        | 51,111 |

Figura 42 Catálogo de Motor propuesto para el sistema de bombeo de la marca GE.

### 2.1.1.1 DIMENSIONAMIENTO DEL MOTOR

Tabla 12 Datos del motor elegido para la propuesta de laboratorio

|                   |                         |
|-------------------|-------------------------|
| <b>Marca</b>      | <b>General Electric</b> |
| <b>Modelo</b>     | <b>V3616</b>            |
| <b>Potencia</b>   | <b>5 HP</b>             |
| <b>Tensión</b>    | <b>208 V</b>            |
| <b>Velocidad</b>  | <b>1770 rpm</b>         |
| <b>Eficiencia</b> | <b>90%</b>              |

## 3 SELECCIÓN DE VFD

Los variadores de frecuencia son dispositivos que permiten un ahorro económico en el funcionamiento de sistemas de bombeo, en el mercado existe una variedad de marcas, modelos y capacidad de potencia a manejar, así como también lo son los niveles de tensión a los que estos se pueden conectar.

### 3.1 CRITERIOS TOMADOS EN CUENTA PARA LA SELECCION

- Variables eléctricas, tensión potencia y frecuencia funcionamiento.
- Tipo de carga a controlar, ya sea de par constante cuadrático o inverso, potencia mecánica para un par inicial alto.

- Condiciones ambientales a las que estará sometido el equipo, humedad y temperatura. Instalación exterior o interior de una sala eléctrica.

### 3.2 PROPUESTA DE DIFERENTES TIPOS DE VARIADORES

A partir de los cálculos de la potencia del motor y las características de la red eléctrica a la que se conectará se ha realizado una búsqueda de catálogos para variadores de frecuencia que se muestran a continuación en la Tabla 13.

Tabla 13 Modelos y características de diferentes variadores de frecuencia

| Variador de Frecuencia     |                     |                                 |             |               |                 |             |
|----------------------------|---------------------|---------------------------------|-------------|---------------|-----------------|-------------|
| Características            | Red de alimentación |                                 |             |               | Salida          |             |
|                            | Modelo y Marca      | Potencia del motor (placa) [kW] | Voltaje [V] | Corriente [A] | Capacidad [KVA] | Voltaje [V] |
| ATV61HU22M3Z(altivar)      | 3.7                 | 240                             | 5.8         | 12.8          | 0-230           | 3,6         |
| U20304KOSS (GE)            | 3.7                 | 240                             | 20          | 6.7           | 0-240           | 17.5        |
| SK2201(Control techniques) | 4                   | 240                             | 15.5        | --            | 240             | --          |

#### 3.1.1 PROPUESTA DE VARIADOR DE FRECUENCIA



| Variadores IP 20  |     |                                    |       |                   |  |   |  |              |       |
|---|-----|------------------------------------|-------|-------------------|--|---|--|--------------|-------|
| Motor   |     | Red de alimentación                |       |                   |  | Altivar 61                                  |  | Referencia   | Peso  |
| Potencia indicada en la placa de características IV     |     | Intensidad de línea I <sub>L</sub> |       | Potencia aparente | I <sub>sc</sub> de línea prevista máxima | Intensidad máxima permanente I <sub>N</sub> | Intensidad máxima transitoria durante 60 s |              |       |
| kW  | CV  | 200 V                              | 240 V | 240 V             | KA                                       | 230 V                                       | A  |              | kg    |
| Tensión de alimentación trifásica: 200...240 V 50/60 Hz |     |                                    |       |                   |  |   |  |              |       |
| 0,75  | 1   | 6,1                                | 5,3   | 2,2               | 5  | 4,8   | 5,7  | ATV 61H075M3 | 3,000 |
| 1,5   | 2   | 11,3                               | 9,6   | 4                 | 5  | 8   | 9,6  | ATV 61HU15M3 | 3,000 |
| 2,2   | 3   | 15                                 | 12,8  | 5,3               | 5  | 11  | 13,2                                       | ATV 61HU22M3 | 4,000 |
| 3   | —   | 19,3                               | 16,4  | 6,8               | 5  | 13,7  | 16,4                                       | ATV 61HU30M3 | 4,000 |
| 4   | 5   | 25,8                               | 22,9  | 9,5               | 5  | 17,5  | 21   | ATV 61HU40M3 | 4,000 |
| 5,5   | 7,5 | 35                                 | 30,8  | 12,8              | 22                                       | 27,5  | 33   | ATV 61HU55M3 | 5,500 |

Figura 43 Catálogo de Variadores de Frecuencia de la marca Altivar. [15]

**Tabla 14** Características del variador elegido.

| Características<br>Modelo<br>y Marca | Red de alimentación             |             |               | Salida          |             |                               |
|--------------------------------------|---------------------------------|-------------|---------------|-----------------|-------------|-------------------------------|
|                                      | Potencia del motor (placa) [kW] | Voltaje [V] | Corriente [A] | Capacidad [KVA] | Voltaje [V] | corriente max transitoria [A] |
| <b>ATV61HU40M3 (altivar)</b>         | 4                               | 240         | 22.9          | 9.5             | 0-230       | 21                            |

#### 4 SELECCION DE SENSOR DE PRESIÓN

Debido a que el caudal de agua a mover y la presión del sistema no es considerado una cantidad exagerada, para nuestro caso necesitamos un sensor que con 1 BAR es más que suficiente, la medida real son 0.65 miliBar que corresponde a 22 pies de columna de agua, ya que todos los dispositivos presentados cumplen con esa característica, lo demás sería que la señal la represente una señal de corriente para que no haya problemas debido a interferencia por ruido electromagnético, en cuanto a la marca ambas son reconocidas en el mercado.

**Tabla 15** Modelos y características de diferentes Sensores de presión.

| Sensor                          | Características | Señal de salida      | Rango de Presión [BAR] | Presión de sobrecarga [BAR] | Presión de rotura [BAR] |
|---------------------------------|-----------------|----------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| (DPF)                           |                 | 4-20 mA              | 1-10                   | 2-20                        | 3-30                    |
| (DPF)                           |                 | 0-10 V <sub>DC</sub> | 1-10                   | 2-20                        | 3-30                    |
| <b>XML K006B2C21(Schneider)</b> |                 | 4-20 mA              | 0-6                    | 12                          | 18                      |
| <b>XML K006B2C21(Schneider)</b> |                 | 0-10 V <sub>DC</sub> | 0-6                    | 12                          | 18                      |

## 5 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO.

### 5.1 INTRODUCCIÓN.

En el presente capítulo se expone el trabajo y los cálculos desarrollados para el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico con características especiales que presenta un sistema híbrido de tensión trifásica, donde el caso de aplicación corresponde a la alimentación eléctrica de un **"Banco de pruebas para ensayo con equipos de bombeo"**, utilizado en prácticas de laboratorio de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador. La novedad del sistema propuesto, debido a sus fines académicos, se basa en el hecho de disponer de una fuente de alimentación confiable en la cual se cuente con todas las características de un sistema fotovoltaico autónomo y

sistemas fotovoltaico interconectado, entendiéndose un sistema autónomo como aquel que alimenta cargas a partir del uso de baterías y módulos fotovoltaicos, y un sistema interconectado como aquel donde la energía solar generada se orienta hacia un inversor para conectarse a la red de suministro eléctrico en el punto de acople común, contando así con todos los componentes de un sistema fotovoltaico muy complejo al que podemos llamar sistema híbrido.

En el estudio del dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos se pudo comprobar que el tipo de sistemas autónomos es el más costoso en términos económicos debido al uso de baterías, entonces surge la siguiente interrogante. ¿Es necesario el uso de baterías en un sistema de bombeo solar? Lo cierto es que no, aunque se pudo demostrar mediante nuestro estudio que, si se pueden utilizar, no es lo más recomendable, el uso de baterías encarece enormemente el sistema y lo hace más complejo teniendo en cuenta todos los mantenimientos y el tipo de espacio para mantener las baterías, en nuestro laboratorio no es necesario bombear agua en horas nocturnas. Para poder utilizar estos sistemas en horas sin sol se utiliza la energía suministrada por la red eléctrica. (*SunFields Europe*).

## 5.2 COMPOSICIÓN DEL SISTEMA HÍBRIDO.

Como se ha mencionado anteriormente el sistema propuesto desarrollado es un sistema híbrido y se compone básicamente del arreglo de módulos fotovoltaicos, el banco de baterías, un arreglo de inversores híbridos y sus controladores de carga. En la figura 11, se muestra el diagrama de bloques del sistema híbrido desarrollado para suministrar la demanda de energía que supone la carga dispuesta para el mismo.

Como se ve en el esquema, los dispositivos se interconectan de forma que el inversor pueda interactuar con la red de distribución eléctrica, con el controlador de carga y con la carga principal de corriente alterna a la que se alimenta con el sistema.

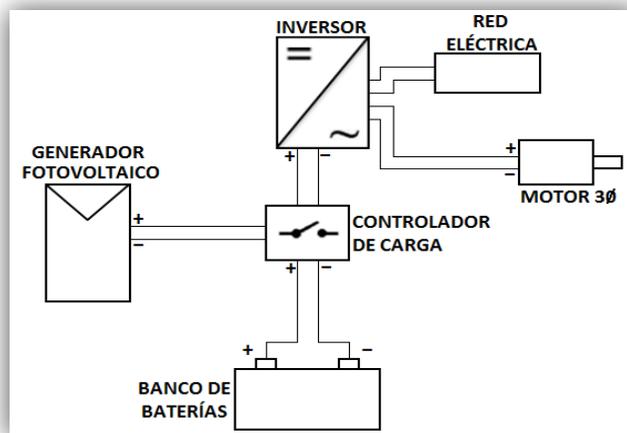


Figura 44 Diagrama de bloques del sistema híbrido propuesto.

## 5.3 METODOLOGÍA DEL DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA.

La radiación solar es un recurso cuya intensidad no es constante y solo se encuentra disponible en una franja horaria del día, el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico se debe realizar a partir de la energía requerida por las cargas según la potencia consumida y la cantidad de horas de

funcionamiento, ya que un dimensionamiento a partir de potencia supone un suministro de corriente continuo.

La metodología aplicada para el dimensionamiento del sistema, en una primera instancia consiste en la definición de la energía total a suministrar, es decir que se establece la potencia nominal de las cargas y la cantidad de horas del día en las que se encuentra funcionando.

### 5.3.1 ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA.

Para nuestro banco de pruebas con equipo de bombeo se tiene un motor de 5 hp, el cual es la carga principal del sistema fotovoltaico, por lo tanto se realizara la conversión de hp a watts para obtener la potencia en las unidades mencionadas.

Haciendo cálculos para un motor de 5 hp de potencia (dato de placa).

Tenemos para calcular el consumo:

$$P [W] = P[hp] * 746 * eficiencia \quad \text{Ecuación 45}$$

$$P [W] = 5 * 746 * 0.9$$

$$P [W] = 3357 W$$

Tabla 16 Cuadro de consumo diario de energía.

| N°           | CARGAS   | CANT | WATT/UNIDAD | HORAS AL DIA | Kwh AL DIA |
|--------------|----------|------|-------------|--------------|------------|
| 1            | MOTOR 3Ø | 1    | 3357        | 4            | 13.428     |
| <b>TOTAL</b> |          |      |             |              | 13.428     |

En el cuadro de consumo diario de energía se establece la energía diaria que requieren las cargas de nuestro sistema, como se puede observar en la tabla 3, la energía diaria requerida es de 13,428 Wh.

### 5.3.2 DIMENSIONAMIENTO DEL BANCO DE BATERÍAS.

Sobredimensionamos la energía diaria requerida del sistema para encontrar la energía final necesaria de operación y ya que en nuestro caso solo tendremos consumo de corriente alterna, entonces utilizamos la siguiente formula:

$$L = \frac{L_{ca}}{\eta_g * \eta_{inv}} = \frac{13.43}{0.9 * 0.96} = 15.54 \text{ kWh} \quad \text{Ecuación 46}$$

Dónde:

- L: es la energía final necesaria.
- L<sub>ca</sub>: es el consumo de corriente alterna kWh.

- $\eta_g$ : Es la eficiencia de las baterías.
- $\eta_{inv}$ : Es la eficiencia del inversor.

### 5.3.2.1 CAPACIDAD DE LAS BATERÍAS.

$$CB^* = \frac{L N}{P_{dmax}} = \frac{15.54 \cdot 1}{0.5} = 31.08 \text{ kWh} \quad \text{Ecuación 47}$$

Dónde:

- $CB^*$ : es la capacidad de la batería en kWh.
- $L$ : es la energía final necesaria.
- $N$ : número de días de autonomía.
- $P_{dmax}$ : máxima profundidad de descarga de la batería.

La capacidad real del banco de baterías la calculamos dividiendo la capacidad de las baterías en [Kwh] entre el voltaje de corriente directa del sistema, así:

$$CB(Ah) = \frac{CB^*}{V_{dc\text{ sistema}}} = \frac{31.08 \times 10^3}{48} = 648 \text{ Ah} \quad \text{Ecuación 48}$$

Dónde:

- $CB(Ah)$ : Capacidad de la batería en Amperios hora.
- $CB^*$ : es la capacidad de la batería en kWh.
- $N$ : número de días de autonomía.

El propósito del establecimiento de dichas variables es conocer la cantidad de días de autonomía que se pueden tener bajo las condiciones de carga a las que se somete el sistema. Debido a que nuestro sistema solo trabajará 4 horas al día, se considera que 1 día de autonomía es suficiente para el sobredimensionamiento del banco de baterías.

### 5.3.2.2 PROFUNDIDAD DE DESCARGA.

Para calcular la profundidad de descarga de la batería, se calcula primero la carga diaria en amperios hora necesaria.

La carga diaria entonces es:

$$L_d = \frac{L}{V_{dc\text{ sistema}}} = \frac{15540}{48} = 323.78 \text{ Ah al día} \quad \text{Ecuación 49}$$

Dónde:

- $L_d$ : Carga de energía diaria.
- $L$ : Es la energía final necesaria.
- $V_{dc\text{ sistema}}$ : Voltaje de corriente directa del sistema.

Entonces la profundidad de descarga será:

$$P_d = \frac{L_d}{CB(Ah)} = \frac{323.78}{648} = 0.499 \approx 50\% \text{ dia} \quad \text{Ecuación 50}$$

Dónde:

- $P_d$ : Profundidad de descarga de la batería.

### 5.3.2.3 SELECCIÓN Y ARMADO DEL BANCO DE BATERÍAS.

Seleccionamos una batería que reúna las condiciones de costo y funcionalidad para nuestro sistema.

Del catálogo seleccionamos la batería modelo DF4001 con capacidad de 220 Ah para un régimen de descarga de C20 de 20h, conectamos 4 baterías en serie para obtener 48 [V] y luego hacemos 3 conexiones en paralelo para llegar a 660 Ah, esto es suficiente para los 648 Ah que se necesitaban.

| Características Eléctricas           |             | BATERIA ESTACIONARIA<br><b>FREEDOM®</b> |        |        |        |  |          |        |        |        |
|--------------------------------------|-------------|---|--------|--------|--------|--|----------|--------|--------|--------|
| Principais Características Elétricas |             |   |        |        |        |  |          |        |        |        |
| MODELOS                              |             | DF300                                   | DF500  | DF700  | DF1000 | DF1500   | DF2000   | DF2500 | DF3000 | DF4001 |
| Capacidade a 25 °C (Ah)              | 10 h        | 24                                      | 30     | 41     | 54     | 76   | 94       | 130    | 156    | 200    |
|                                      | 20 h        | 26                                      | 36     | 45     | 60     | 80   | 105      | 150    | 170    | 220    |
|                                      | 100 h       | 30                                      | 40     | 50     | 70     | 93   | 115      | 165    | 185    | 240    |
| Dimensões (mm)                       | Comprimento | 175                                     | 175    | 210    | 244    | 330  | 330      | 511    | 511    | 525    |
|                                      | Largura     | 175                                     | 175    | 175    | 175    | 172  | 172      | 213    | 213    | 275    |
|                                      | Altura      | 175                                     | 175    | 175    | 175    | 240  | 240      | 230    | 230    | 250    |
| Peso (kg)                            |             | 8,8                                     | 9,7    | 12,5   | 14,7   | 23,9   | 27,1     | 44,6   | 48,3   | 60,3   |
| Torque                               | Mínimo      | 9 N.m                                   | 9 N.m  | 9 N.m  | 9 N.m  | 13,6 N.m   | 13,6 N.m | 9 N.m  | 9 N.m  | 9 N.m  |
|                                      | Máximo      | 11 N.m                                  | 11 N.m | 11 N.m | 11 N.m | 20,3 N.m   | 20,3 N.m | 11 N.m | 11 N.m | 11 N.m |
| Tensão de Flutuação                  |             |   |        |        |        | de 13,2 a 13,8 V a 25 °C   |          |        |        |        |
| Tensão de carga / equalização        |             |   |        |        |        | de 14,4 a 15,5 V a 25 °C   |          |        |        |        |
| Compensação de Temperatura           |             |   |        |        |        | para cada 1°C acima de 25 °C, subtrair 0,033V<br>para cada 1°C abaixo de 25 °C, adicionar 0,033V |          |        |        |        |

Figura 45 Características eléctricas de los modelos de baterías Freedom.

### 5.3.2.4 BANCO DE BATERÍAS.

# De Baterías a 48 V. Esta cantidad permite encontrar la cantidad de baterías que lograrían una capacidad de corriente suficiente para atender las cargas del sistema.

$$\#BAT_{a48V} = \frac{CB(Ah)}{CapC20} = \frac{648}{220} = 2.94 \approx 3 \text{ baterías}_{a48V} \quad \text{Ecuación 51}$$

# De Baterías reales a 12 V. Es el total de baterías a utilizarse en el sistema.

$$\#BAT_{a12V} = \#BAT_{a48V} * \#BAT_{serie} = 3 * 4 = 12 \text{ Baterías} \quad \text{Ecuación 52}$$

Dónde:

- #BAT<sub>a12v</sub>: Número real de baterías del sistema.
- #BAT<sub>a48v</sub>: Número de cadena de baterías en serie que dan 48 V.
- CapC20: Régimen de descarga de 20 horas.
- #BAT<sub>serie</sub>: Número de baterías por cada cadena en serie.

Según los días de autonomía que se dispongan para el sistema, se encuentra la capacidad que debe tener el banco de baterías para atender la carga de acuerdo a los días de autonomía establecidos.

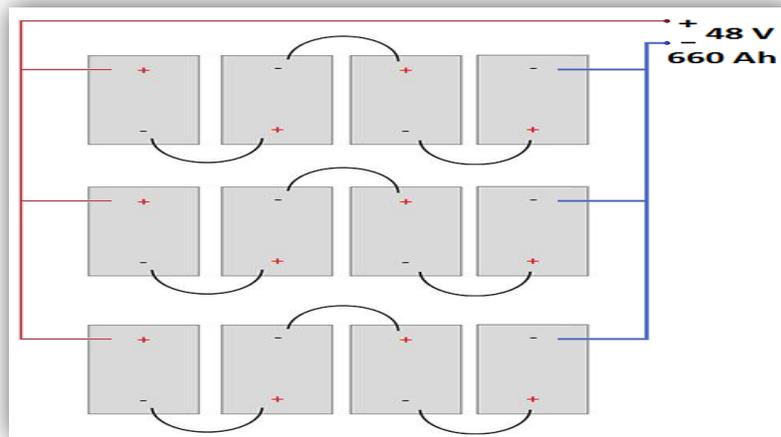


Figura 46 Arreglo de baterías calculado.

### 5.3.3 DIMENSIONAMIENTO DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO.

En esta etapa del dimensionamiento se realizarán los cálculos necesarios para determinar el tipo de paneles fotovoltaicos (PFV), se evaluará la cantidad de módulos en paralelo y en serie que conformarán los string y los arreglos dispuestos para realizar la alimentación del sistema.

#### 5.3.3.1 ELECCIÓN DEL PFV.

Utilizando la siguiente ecuación sobredimensionaremos la potencia pico que deberá tener todo nuestro arreglo de paneles.

$$\text{Potencia (Wp)} = 1.25 * \frac{L}{(\text{HSP})} = 1.25 * \frac{15540}{5} = 3885 \text{ Wp} \quad \text{Ecuación 53}$$

Para la elección del módulo fotovoltaico, se seleccionó el panel Canadian Solar CS6P-235.

| CS6P-230/235/240/245/250M       |                        |           |           |           |           |
|---------------------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Electrical Data                 |                        |           | All-black |           |           |
| STC                             | CS6P-230M              | CS6P-235M | CS6P-240M | CS6P-245M | CS6P-250M |
| Nominal Maximum Power (Pmax)    | 230W                   | 235W      | 240W      | 245W      | 250W      |
| Optimum Operating Voltage (Vmp) | 29.9V                  | 30.1V     | 30.2V     | 30.3V     | 30.4V     |
| Optimum Operating Current (Imp) | 7.70A                  | 7.82A     | 7.95A     | 8.09A     | 8.22A     |
| Open Circuit Voltage (Voc)      | 37.1V                  | 37.2V     | 37.3V     | 37.4V     | 37.5V     |
| Short Circuit Current (Isc)     | 8.22A                  | 8.34A     | 8.46A     | 8.61A     | 8.74A     |
| Module Efficiency               | 14.30%                 | 14.61%    | 14.92%    | 15.23%    | 15.54%    |
| Operating Temperature           | -40°C~+85°C            |           |           |           |           |
| Maximum System Voltage          | 1000V (IEC) /600V (UL) |           |           |           |           |
| Maximum Series Fuse Rating      | 15A                    |           |           |           |           |
| Application Classification      | Class A                |           |           |           |           |
| Power Tolerance                 | 0 ~ +5W                |           |           |           |           |

Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000W/m<sup>2</sup>, spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C

| Performance at Low Irradiance     |        |            |
|-----------------------------------|--------|------------|
| Temperature Coefficient           | Pmax   | -0.45%/°C  |
|                                   | Voc    | -0.35 %/°C |
|                                   | Isc    | 0.060 %/°C |
| Normal Operating Cell Temperature | 45±2°C |            |

Industry leading performance at low irradiation environment, +95.5% module efficiency from an irradiance of 1000w/m<sup>2</sup> to 200w/m<sup>2</sup> (AM 1.5, 25 °C)

Figura 47 Datos eléctricos del panel Canadian Solar CS6P-235.

### 5.3.3.2 CANTIDAD DE PFV.

Calculamos la cantidad total de modulos fotovoltaicos en nuestro sistema.

$$\#Paneles = \frac{\text{Potencia (Wp)}}{\text{Potencia}_{\text{panel}}} = \frac{3885}{235} = 16.53 \approx 17 \text{ paneles} \quad \text{Ecuación 54}$$

Dónde:

- #Paneles: Número total de paneles fotovoltaicos del sistema.
- Potencia (Wp): Potencia total del sistema en Watt pico.
- Potencia<sub>panel</sub>: Potencia nominal del panel fotovoltaico.

A cantidad total de paneles obtenida le sumamos un panel más para tener un número par y así tener un número equilibrado para el cálculo de los arreglos, en total la cantidad final será de 18 paneles. Con este número final calculamos la potencia real que tendrá nuestro sistema.

$$\text{Potencia(Wp)}_{\text{real}} = \#Paneles * \text{Potencia}_{\text{panel}} = 18 * 235 = 4230 \text{ Wp} \quad \text{Ecuación 55}$$

### 5.3.3.3 ANÁLISIS DE TEMPERATURA.

Haciendo análisis de temperatura para determinar la cantidad de paneles por string (paneles en serie), este se obtiene analizando el panel bajo las condiciones de mínima temperatura de la celda en el sitio de instalación.

$$\text{Voc}_{\text{min}} = \text{Voc(V)} + \beta * \Delta T_{\text{max}} * \text{Voc(V)} \quad \text{Ecuación 56}$$

$$\text{Voc}_{\text{min}} = 37.2 + (-0.0035) * 45 * 37.2 = 31.34 \text{ V}$$

$$V_{oc_{max}} = V_{oc}(V) + \beta * \Delta T_{min} * V_{oc}(V)$$

Ecuación 57

$$V_{oc_{max}} = 37.2 + (-0.0035) * (-20) * 37.2 = 39.80 \text{ V}$$

#### 5.3.3.4 STRING Y ARREGLOS DE PANELES.

Los módulos fotovoltaicos se encuentran en tensiones típicas, por lo que a partir del establecimiento de un voltaje nominal soportado a la entrada del controlador de carga, se determina la cantidad de módulos que se deben conectar en serie para que el generador fotovoltaico tenga la tensión adecuada.

Ahora podemos calcular la cantidad de paneles por cada string.

$$\#Paneles_{string} = \frac{V_{cc}}{V_{oc_{max}}} = \frac{150}{39.8} = 3.77 \Rightarrow 3 \text{ paneles} \quad \text{Ecuación 58}$$

$$Potencia_{String} = P_{MFV} * \#MFV_{string} = (235 * 3) = 705 \text{ W}_p \quad \text{Ecuación 59}$$

Para tener un sistema de arreglos de paneles equilibrado se opta por tener dos arreglos de 9 paneles, cada arreglo tendrá 3 strings, con lo que tendríamos en total 18 paneles solares en el sistema.

Por cada arreglo tendremos 9 paneles fotovoltaicos, cada arreglo tendrá una potencia de 2115 W, su voltaje en circuito abierto estará entre 94.02 V - 119.41 V, la corriente de corto circuito por arreglo estará entre 24.72 A - 25.70 A.

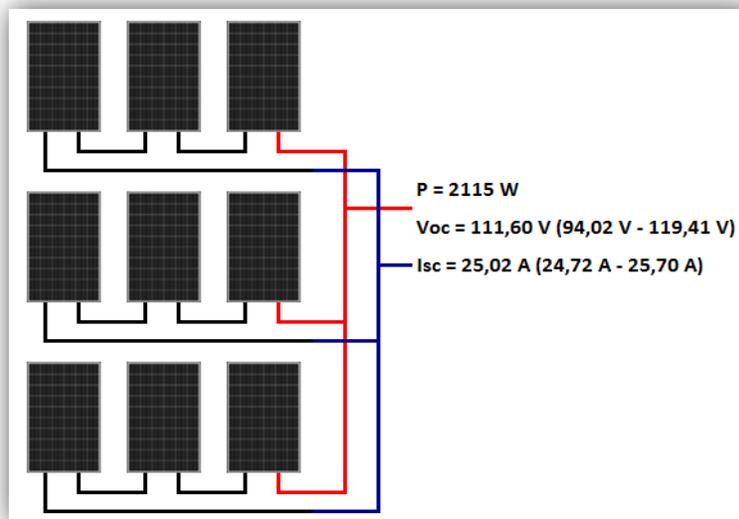


Figura 48 Arreglo fotovoltaico calculado y la variación con la temperatura.

### 5.3.4 CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DEL CONTROLADOR DE CARGA.

El controlador de carga trabaja en función de varios factores, uno de ellos es su capacidad, ya que al encontrar la capacidad ideal de este dispositivo eléctrico se debe tener en cuenta el número de paneles solares y baterías del sistema, se debe calcular la corriente total para tener un parámetro de la capacidad de corriente máxima que podrá manejar el controlador, el voltaje nominal del sistema es otro factor importante a la hora de elegir el tipo de controlador de carga.

Utilizamos la siguiente ecuación para el cálculo de la corriente en el controlador:

$$I_{REG} = 1.25 * I_{SCarreglo} = 1.25 * 25.70 = 32.13 \text{ A} \quad \text{Ecuación 60}$$

Dónde:

- $I_{REG}$ : Capacidad total del controlador en amperios.
- $I_{SCarreglo}$ : Corriente de cortocircuito del arreglo.

La entrada de corriente del controlador de carga debe ser mayor a la  $I_{REG}$  calculada, para nuestro caso utilizaremos un controlador de carga TRISTART MPPT modelo TS-MPPT-45 por cada arreglo.

| Parámetros eléctricos                |  |                 |
|--------------------------------------|--|-----------------|
|                                      | TS-MPPT-45-150V  | TS-MPPT-60-150V |
| Voltaje nominal del sistema          | 12, 24, 36 o 48 Voltios de CC  |                 |
| Corriente máxima de batería          | 45 Amp.  | 60 Amp.         |
| Voltaje máximo de entrada solar      | 150 Voltios CC   |                 |
| Rango de voltaje de batería          | 8 - 72 Voltios CC  |                 |
| Potencia nominal máxima de entrada:  |  |                 |
| 12 Voltios                           | 600 Watts  | 800 Watts       |
| 24 Voltios                           | 1200 Watts   | 1600 Watts      |
| 48 Voltios                           | 2400 Watts   | 3200 Watts      |
| Precisión de voltaje                 | 12 / 24 V: $\leq 0.1 \% \pm 50 \text{ mV}$<br>48 V: $\leq 0.1 \% \pm 100 \text{ mV}$ |                 |
| Consumo propio                       | 1,3 - 2,7 Voltios CC   |                 |
| Protección contra picos transitorios | 4500 Watts / conector  |                 |

Figura 49 Parámetros eléctricos del controlador de carga seleccionado.

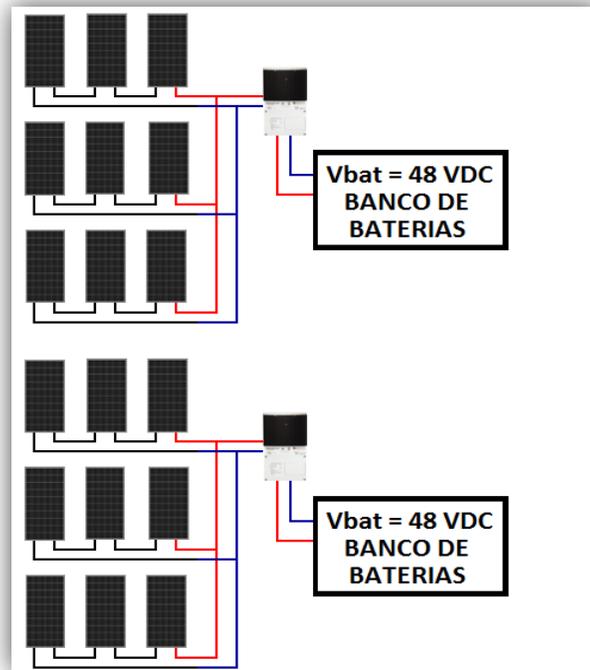


Figura 50 Total de arreglos de paneles del sistema con sus controladores de carga.

### 5.3.5 ELECCIÓN DEL INVERSOR SOLAR.

La capacidad del inversor es el parámetro principal en la selección del inversor ideal además de que la necesidad de carga es grande, tenemos que es trifásica. Debido a esto, el inversor propuesto es el **Steca Xtender XTM2600-48**, este es un inversor solar híbrido que tiene la capacidad de poder conectarse paralelamente con varios inversores Steca Xtender y trabajar de forma trifásica.

Este inversor cuenta con contactos multifuncionales sin potencial, pueden programarse para numerosas aplicaciones. Pueden reaccionar ante cualquier evento dentro o fuera del inversor (disponibilidad de la red, tensión de la batería, aviso de fallo, etc.). También pueden programarse como temporizadores o pueden conectarse a horas concretas (durante la noche, el fin de semana). Así, pueden utilizarse como mecanismo de inicio del generador, para la desconexión de los consumidores menos importantes, para la visualización de un fallo, para cargar la batería en función de la situación, etc.

| INVERSORES SINUSOIDALES                       |   |                  |                  |                   |                   |                  |                  |                  |                  |
|---|---|------------------|------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|   | XTS<br>900-12   | XTS<br>1200-24   | XTS<br>1400-48   | XTM<br>1500-12    | XTM<br>2000-12    | XTM<br>2400-24   | XTM<br>3500-24   | XTM<br>2600-48   | XTM<br>4000-48   |
| Funcionamiento                                |   |                  |                  |                   |                   |                  |                  |                  |                  |
| Tensión del sistema                           | 12 V  | 24 V             | 48 V             | 12 V              | 12 V              | 24 V             | 24 V             | 48 V             | 48 V             |
| Potencia continuo                             | 500 VA  | 650 VA           | 750 VA           | 1500 VA           | 2000 VA           | 2000 VA          | 3000 VA          | 2000 VA          | 3500 VA          |
| Potencia continuo (con ECF-01)                | 650 VA  | 800 VA           | 900 VA           |                   |                   |                  |                  |                  |                  |
| Potencia 30 min.                              | 700 VA  | 1000 VA          | 1200 VA          | 1500 VA           | 2000 VA           | 2400 VA          | 3500 VA          | 2600 VA          | 4000 VA          |
| Potencia 30 min. (con ECF-01)                 | 900 VA  | 1200 VA          | 1400 VA          |                   |                   |                  |                  |                  |                  |
| Potencia 5 sec.                               | 2300 VA   | 2500 VA          | 2800 VA          | 3400 VA           | 4800 VA           | 6000 VA          | 9000 VA          | 6500 VA          | 10500 VA         |
| Eficiencia máxima                             | 93 %  | 93 %             | 93 %             | 93 %              | 93 %              | 94 %             | 94 %             | 96 %             | 96 %             |
| Consumo standby                               | 1,4 W   | 1,5 W            | 1,6 W            | 1,4 W             | 1,4 W             | 1,6 W            | 1,6 W            | 2,0 W            | 2,1 W            |
| Consumo ON                                    | 7,0 W   | 8,0 W            | 8,0 W            | 8,0 W             | 10,0 W            | 9,0 W            | 12,0 W           | 10,0 W           | 14,0 W           |
| Corrección del factor de potencia (PFC) según | EN 61000-3-2  |                  |                  |                   |                   |                  |                  |                  |                  |
| Nivel acústico sin ventilación                | 40 dB   |                  |                  |                   |                   |                  |                  |                  |                  |
| Nivel acústico con ventilación                | 45 dB   |                  |                  |                   |                   |                  |                  |                  |                  |
| Datos de entrada                              |   |                  |                  |                   |                   |                  |                  |                  |                  |
| Tensión de entrada                            | < 265 V AC (ajustable: 150 V AC ... 265 V AC)                         |                  |                  |                   |                   |                  |                  |                  |                  |
| Corriente de carga ajustable 0 A ...          | 35 A  | 25 A             | 12 A             | 70 A              | 100 A             | 55 A             | 90 A             | 30 A             | 50 A             |
| Corriente máx. en el sistema de transferencia | 16 A  | 16 A             | 16 A             | 50 A              | 50 A              | 50 A             | 50 A             | 50 A             | 50 A             |
| Frecuencia de entrada                         | 45 Hz ... 65 Hz   |                  |                  |                   |                   |                  |                  |                  |                  |
| Datos de la batería                           |   |                  |                  |                   |                   |                  |                  |                  |                  |
| Tensión de la batería                         | 9,5 V ...<br>17 V   | 19 V ...<br>34 V | 38 V ...<br>68 V | 9,5 V ...<br>17 V | 9,5 V ...<br>17 V | 19 V ...<br>34 V | 19 V ...<br>34 V | 38 V ...<br>68 V | 38 V ...<br>68 V |
| Datos de salida CA                            |   |                  |                  |                   |                   |                  |                  |                  |                  |
| Tensión de salida                             | 230 V CA ±2 % / 190 V CA ... 245 V CA (onda senoidal pura) / 120 V CA |                  |                  |                   |                   |                  |                  |                  |                  |
| Frecuencia de salida                          | 50 Hz, ajustable: 45 Hz ... 65 Hz ±0,05 % (controlada por cristal)    |                  |                  |                   |                   |                  |                  |                  |                  |
| Coefficiente de distorsión                    | < 2 %   |                  |                  |                   |                   |                  |                  |                  |                  |
| Detección de consumidor (standby)             | 2 W ... 25 W  |                  |                  |                   |                   |                  |                  |                  |                  |

Figura 51 Datos técnicos del inversor Steca Xtender XTM2600-48.

El voltaje de salida y entrada AC es de 120 V a una frecuencia de 60 Hz, el voltaje de entrada a las baterías, el voltaje de entrada a las baterías es de 48 Vdc.

$$P_{invT} = \frac{P_{ac}}{\eta_g \cdot \eta_{inv}} * 1.25 = \frac{3357}{0.9 \cdot 0.96} * 1.25 = 4856.77 \approx 4.86 \text{ kW} \quad \text{Ecuación 61}$$

$$\#Inv = \frac{P_{invT}}{P_{inv}} = \frac{4.86}{2} = 2.43 \approx 3 \text{ Inv de 2.0 kW} \quad \text{Ecuación 62}$$

Dónde:

- $P_{invT}$ : Potencia total que debe soportar el inversor.
- $P_{ac}$ : Potencia del sistema de corriente alterna.
- $\eta_g$ : Es la eficiencia de las baterías.
- $\eta_{inv}$ : Es la eficiencia del inversor.
- $\#Inv$ : Número de inversores.
- $P_{inv}$ : Potencia nominal del inversor.

Al calcular el número de inversores necesarios para nuestro sistema nos quedan 3 inversores cada uno de 2 kW de potencia, teniendo que la configuración de inversores tendría una potencia nominal de 6.0 kW.

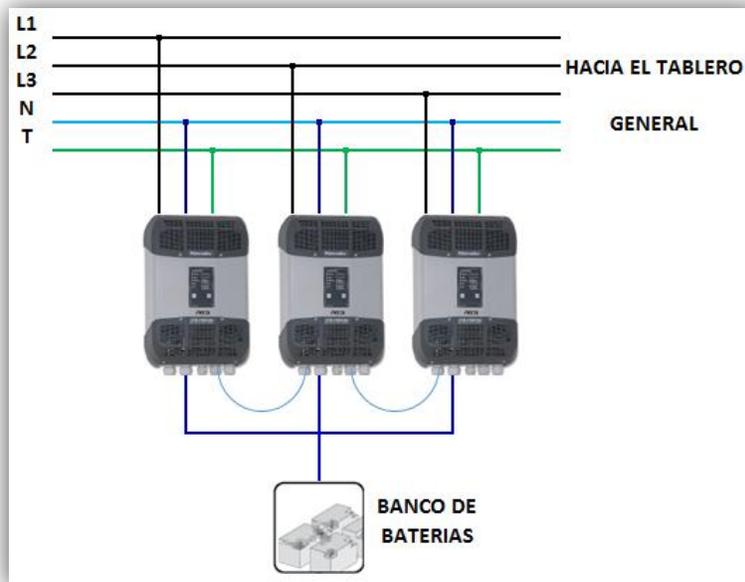


Figura 52 Configuración de los inversores, 3 fases, 120/208 Vac, 6 Kw.

### 5.3.6 CÁLCULO DE FUSIBLE PARA EL BANCO DE BATERÍAS.

Se estima para las baterías seleccionadas una resistencia de 4 mili ohm, por lo que la corriente de corto circuito que aportan las baterías, está definida por:

$$I_{ccktBAT} = \frac{V_{BAT}}{R_{BAT}} = \frac{12 \text{ V}}{4 \times 10^{-3} \Omega} = 3 \text{ KA} \quad \text{Ecuación 63}$$

Calculamos el fusible de las baterías.

$$FUS_{salida \text{ reg}} = \frac{I_{reg \text{ ttl}}}{(0.8)} = \frac{(45A)(2)}{0.8} = 112.5 \text{ A} \quad \text{Ecuación 64}$$

125 A/1P NH 2XL 1000Vcc 50KA Ref.: 901100760 Marca: KPS Limitador de corriente de corto circuito. Tipo gPV: fusibles de rango completo para la protección de módulos fotovoltaicos.

**• Fusibles de cuchillas NH-2XL 1000 Vcc gPV**

- Tensión nominal 1000 Vcc.
- Poder de corte 50 kA.
- Curva tipo gPV
- Según norma IEC 60269-6.

| Artículo                 | Código    | EAN 13        | Emb. |
|--------------------------|-----------|---------------|------|
| NH-2XL 125A gPV 1100 Vdc | 901100756 | 8435394729282 | 10   |
| NH-2XL 100A gPV 1100 Vdc | 901100757 | 8435394729299 | 10   |
| NH-2XL 200A gPV 1100 Vdc | 901100758 | 8435394729305 | 10   |
| NH-2XL 250A gPV 1100 Vdc | 901100759 | 8435394729312 | 10   |
| NH-2XL 315A gPV 1100 Vdc | 901100760 | 8435394729329 | 10   |
| NH-2XL 350A gPV 1100 Vdc | 901100761 | 8435394729336 | 10   |
| NH-2XL 400A gPV 1100 Vdc | 901100762 | 8435394729343 | 10   |

Figura 53 Catálogo de fusibles de cuchillas a utilizar.

### 5.3.7 RESUMEN DEL DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA.

Se presentó una propuesta particular de los sistemas fotovoltaicos, en la cual se establece un sistema fotovoltaico híbrido, donde la energía generada por los paneles fotovoltaicos se orienta para alimentar las baterías, siendo estas reguladas por el controlador de carga, obteniendo una tensión de corriente continua de 48 voltios, con la configuración de los inversores híbridos podemos obtener la tensión trifásica que demanda la carga principal de corriente continua y al mismo tiempo nos permite una interconexión a la red de distribución eléctrica.

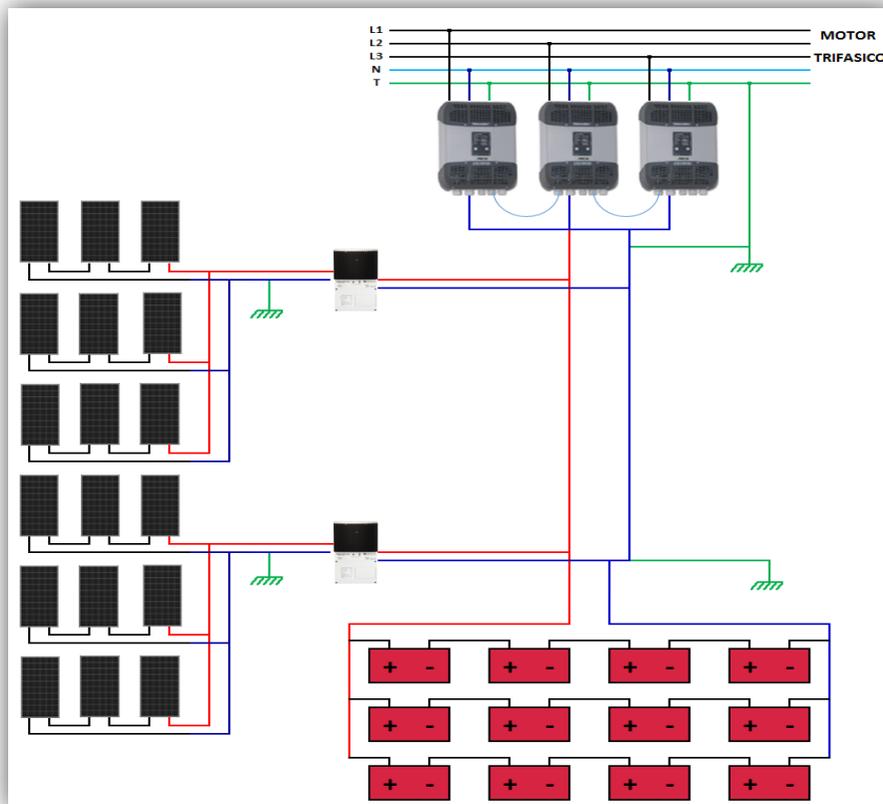


Figura 54 Esquema final del sistema híbrido propuesto.

**Tabla 17** Resumen de dispositivos y capacidad del sistema fotovoltaico.

| Dimensionamiento del sistema           |       |    |
|--|-------|----|
| <b>Potencia total en PFV</b>           | 4.23  | kW |
| <b>Total de paneles</b>                | 18    |    |
| <b>MFV por arreglo</b>                 | 9     |    |
| <b>Total de arreglos</b>               | 2     |    |
| <b>Total de Baterías de 12V</b>        | 12    |    |
| <b>Capacidad del Banco de Baterías</b> | 660.0 | Ah |
| <b>Total de controladores</b>          | 2.0   |    |
| <b>Total de Inversores de 2000KW</b>   | 3.0   |    |

El empleo de los sistemas fotovoltaicos es un hecho de actualidad, ya que este tipo de generación se le conoce como energías limpias, lo que quiere decir que es amigable con la naturaleza, previene la contaminación, combaten el cambio climático y en general contribuyen a conservar el medio ambiente y los recursos naturales.

El objetivo en nuestra investigación se cumple al demostrar la viabilidad en la implementación y dimensionamiento de estos sistemas, demostrando con nuestra propuesta compleja el tipo de instalación que sería necesaria en caso de tener varias fuentes o generadores renovables de corriente eléctrica interconectadas en un solo sistema y conectado a la red de distribución eléctrica.

## **6 ANÁLISIS ECONÓMICO**

### **6.1 ESPECIFICACIÓN**

Para este apartado es importante señalar lo siguiente: debido a la naturaleza didáctica del proyecto, el sistema de bombeo no estará trabajando todo el tiempo, siendo encendido únicamente algunas horas ciertos días. Si se implementara una planta fotovoltaica únicamente para este uso, saldría caro debido a que se estaría aprovechando de mala manera todo el recurso de la tecnología solar invertida. Entonces, la solución óptima para esta situación es que la planta fotovoltaica esté inyectando su energía producida a la red eléctrica que alimenta la escuela, en todo momento.

El siguiente análisis está desarrollado para un uso total de la planta solar, considerando la carga principal que es el sistema de bombeo. Esto quiere decir que ha sido dimensionada para esta, y que esta capacidad instalada, es la que será inyectada a la red.

### **6.2 ELEMENTOS UTILIZADOS EN LA RED HÍBRIDA Y SISTEMA DE BOMBEO.**

Se enumeran a continuación, los elementos empleados. Incluyen marca, cantidad y precio.

**Tabla 18** Elementos a usar

| Elemento                           | Marca             | Cantidad | Precio [\$] | Precio total [\$] |
|------------------------------------|-------------------|----------|-------------|-------------------|
| <b>Panel Fotovoltaico de 235 W</b> | Canadian Solar    | 18       | 212         | 3816              |
| <b>Batería de 150 ah</b>           | Freedom DF2500    | 12       | 495         | 5940              |
| <b>Inversor 2 kW</b>               | On-Grid Revosolar | 3        | 698         | 2094              |
| <b>Regulador de carga</b>          | Freedom           | 3        | 541         | 1082              |
| <b>Protecciones y cableado</b>     | Siemens           | X        | 1000        | 1000              |
| <b>Total</b>                       |                   |          |             | <b>13512</b>      |

Esto forma una cantidad total de \$13512 USD únicamente en la adquisición del equipo de la planta solar. La parte del equipo de bombeo, válvulas, motores y variador de frecuencia, se muestran en la siguiente tabla.

La parte del equipo de bombeo, válvulas, motores y variador de frecuencia, se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 19** Costo de Equipo de bombeo Hidráulico

| Elemento                            | Marca                 | Precio [\$] |
|-------------------------------------|-----------------------|-------------|
| <b>Motor de 5hp</b>                 | General Eléctric      | 825         |
| <b>Bomba centrífuga</b>             | National Pump Company | 690         |
| <b>Variador de frecuencia</b>       | Altivar               | 2130        |
| <b>Válvulas, tuberías y tanques</b> | X                     | 200         |
| <b>Total</b>                        |                       | <b>3845</b> |

La sumatoria total de la parte fotovoltaica y del motor, bomba, variador y demás implementos para el sistema de bombeo es la sumatoria de ambas cantidades. Por un lado, tenemos \$13512 USD y por otro \$3845 USD. Entonces, el valor del proyecto total asciende a \$17357 USD. Para los

valores prácticos de recuperación de la inversión total, se ha hecho un estimado únicamente para la red híbrida sin contar con el sistema de bombeo, esto debido a que esta metodología, puede llegar a ser usada para otros proyectos particulares.

### **6.3 CONCEPTOS TOMADOS EN CUENTA DURANTE EL ANÁLISIS ECONOMICO.**

A continuación, los conceptos empleados en este estudio son explicados de manera clara para su comprensión.

#### **6.3.1 PORCENTAJE DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA.**

La capacidad que se tiene a partir de la red fotovoltaica, ajusta la demanda de esta. Sirve para representar en la curva del punto de operación económico, en qué momento el ahorro es mayor que el pago de la tarifa a la distribuidora.

#### **6.3.2 PORCENTAJE DE ENERGÍA DE LA DISTRIBUIDORA.**

Es el complemento del porcentaje de energía fotovoltaica. También se representa en la curva de operación económica para determinar el punto óptimo de su utilización.

#### **6.3.3 POTENCIA FOTOVOLTAICA DEMANDADA.**

Se toma en base a la potencia mensual demandada por el sistema de bombeo. Se parte de que no se tomará nada de energía fotovoltaica hasta que se tomará por completo únicamente energía FV.

#### **6.3.4 POTENCIA DEMANDADA A LA DISTRIBUIDORA.**

Se complementa con la potencia fotovoltaica demandada. De estas dos fuentes es que se crea la red híbrida.

#### **6.3.5 TARIFA FOTOVOLTAICO PONDERADO.**

Este apartado, se basa en que la tarifa fotovoltaica no siempre será la misma, partiendo del tamaño del proyecto. Cuando el sistema de bombeo toma el 100% de energía FV, se debe dimensionar en su totalidad de esta manera, entonces el costo del proyecto aumenta y es por ello que es ponderado, porque a mayor sea el proyecto, más va a valer esta supuesta tarifa. Es muy importante aclarar lo siguiente, si bien aparentemente es una tarifa, pero lo que representa es un ahorro. Como ya se dijo, a mayor sea el proyecto cuesta más, pero permite suplir mayor cantidad de demanda lo que se traduce como un mayor ahorro. En la curva del punto óptimo de operación, se apreciará de mejor manera este apartado.

Esta se calcula de la siguiente manera:

$$Tarifa = \frac{\sum(\text{Precio de cada elemento} \times \text{Cantidad de elementos}) + \text{Costos fijos}}{\text{Años de vida} \times 12 \times 24} \quad \text{Ecuación 65}$$

#### **6.3.6 COSTO MENSUAL DISTRIBUIDORA.**

Se ha hecho la suma correspondiente para cada franja horaria considerando porcentajes de utilización. Es decir, en pico se ha estimado que de los 993 Kwh el 90% estará siendo usado. Luego, sabiendo que el sistema estará alimentado a la red en valle se ha estimado un 9% de ese consumo

de energía total y en resto el 1% restante. Además, se ha sumado el costo por comercialización y por distribución en base al pliego tarifario vigente para el primer trimestre de 2017.

#### **6.3.7 COSTO DE ENERGIZAR CON ENERGÍA FOTOVOLTAICA.**

Es la potencia demandada por la tarifa ponderada de energía fotovoltaica. Expresa el ahorro mensual del proyecto traducido a dólares.

#### **6.3.8 RECUPERACIÓN ANUAL FOTOVOLTAICA.**

Es la cantidad de dinero que recuperará anualmente al no usar energía de la distribuidora. El cálculo se hace en base a los costos dependiendo del tamaño del proyecto.

#### **6.3.9 GASTO ANUAL CON LA DISTRIBUIDORA.**

Es el costo mensual de la distribuidora, multiplicado por 12. Representa el pago anual dependiendo del porcentaje que maneje la red híbrida.

##### **6.3.9.1 TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE INVERSIÓN**

Es igual al costo total del proyecto entre el ahorro anual con CAESS más el incentivo económico por generar energía FV.

#### **6.4 CUADRO COMPARATIVO DEL ANÁLISIS ECONÓMICO.**

En la tabla 19 se muestran diferentes escenarios en los cuales se observa el factor económico en el cual se busca un equilibrio entre lo que se debe pagar a las distribuidoras y lo que se ha invertido para producir la energía necesaria para poner en funcionamiento el equipo de bombeo.

**Tabla 20** Comparativa económica con diferentes escenarios.

| % de energía fotovoltaica | % de energía de la distribuidora | Potencia FV demandada | Potencia demandada a distribuidora | Tarifa FV ponderada | Costo mensual distribuidora | Costo de Energizar por FV | Recuperación Anual FV | Gasto anual con la distribuidora | Tiempo de recuperación de inversión (años) |
|---------------------------|----------------------------------|-----------------------|------------------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------|----------------------------------|--|
| <b>0</b>                  | 100                              | 0                     | 402,84                             | 0,000000            | 63,927488                   | 0,000000                  | 0,00                  | <b>767,13</b>                    | <b>#¡DIV/0!</b>                            |
| <b>10</b>                 | 90                               | 40,284                | 362,556                            | 0,012880            | 59,448605                   | 0,518843                  | 6,23                  | <b>713,38</b>                    | <b>2680,97</b>                             |
| <b>20</b>                 | 80                               | 80,568                | 322,272                            | 0,025759            | 54,969722                   | 2,075372                  | 24,90                 | <b>659,64</b>                    | <b>670,24</b>                              |
| <b>30</b>                 | 70                               | 120,852               | 281,988                            | 0,038639            | 50,490839                   | 4,669587                  | 56,04                 | <b>605,89</b>                    | <b>297,89</b>                              |
| <b>40</b>                 | 60                               | 161,136               | 241,704                            | 0,051519            | 46,011955                   | 8,301488                  | 99,62                 | <b>552,14</b>                    | <b>167,56</b>                              |
| <b>50</b>                 | 50                               | 201,42                | 201,42                             | 0,064398            | 41,533072                   | 12,971075                 | 155,65                | <b>498,40</b>                    | <b>107,24</b>                              |
| <b>60</b>                 | 40                               | 241,704               | 161,136                            | 0,077278            | 37,054189                   | 18,678348                 | 224,14                | <b>444,65</b>                    | <b>74,47</b>                               |
| <b>70</b>                 | 30                               | 281,988               | 120,852                            | 0,090157            | 32,575306                   | 25,423307                 | 305,08                | <b>390,90</b>                    | <b>54,71</b>                               |
| <b>80</b>                 | 20                               | 322,272               | 80,568                             | 0,103037            | 28,096423                   | 33,205952                 | 398,47                | <b>337,16</b>                    | <b>41,89</b>                               |
| <b>90</b>                 | 10                               | 362,556               | 40,284                             | 0,115917            | 23,617540                   | 42,026283                 | 504,32                | <b>283,41</b>                    | <b>33,10</b>                               |
| <b>100</b>                | 0                                | 402,84                | 0                                  | 0,128796            | 19,138657                   | 51,884300                 | 622,61                | <b>229,66</b>                    | <b>26,81</b>                               |

#### 6.4.1 PUNTO DE EQUILIBRIO ENTRE LA GENERACION DE ENERGIA Y EL CONSUMO DE LA RED ELECTRICA

En base a la tabla anterior, esta curva se generó para encontrar el punto de operación óptimo a nivel económico. Al nivel del 71 de generación fotovoltaica, se aprecia como el ahorro en energía con energía FV pasa a ser mayor que el gasto en el pago a CAESS. Se recomienda trabajar a la derecha de este punto. Se observa en la tabla anterior, que a partir del 70% el tiempo de recuperación de la inversión se vuelve la mitad y tiende a disminuir; es decir, se vuelve económicamente atractivo para un inversionista.

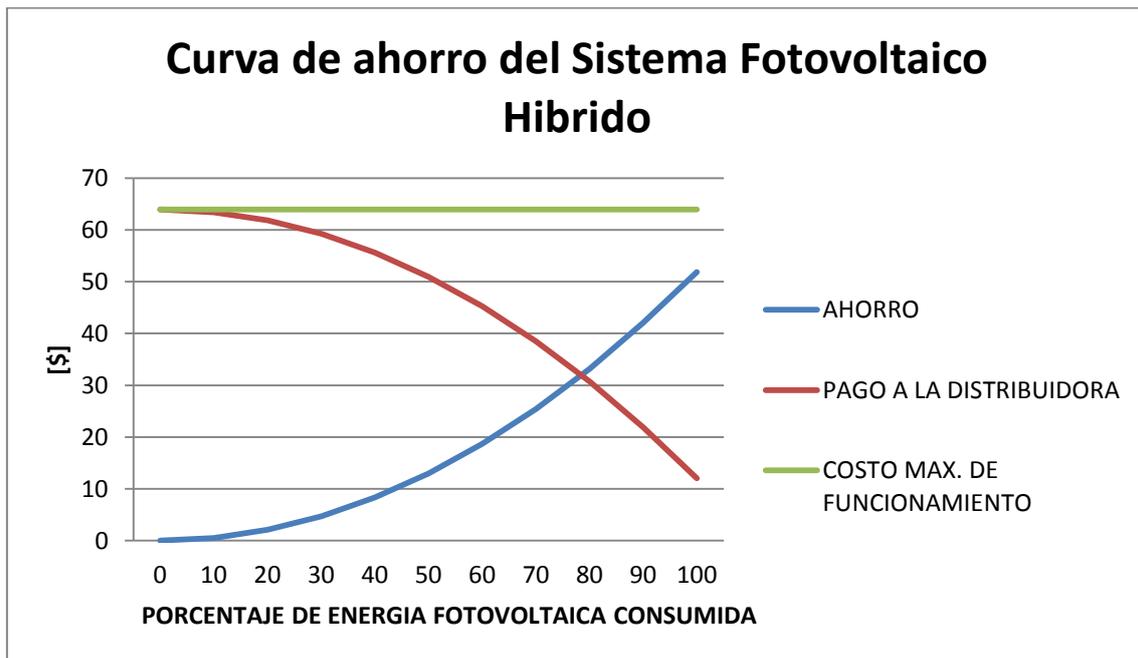


Figura 55 Curva de optimización de la red híbrida.

En base a los resultados anteriores, esta curva se generó para encontrar el punto de operación óptimo a nivel económico. Arriba del 78% de generación fotovoltaica, se aprecia como el ahorro en energía FV pasa a ser mayor que el gasto en el pago a CAESS. Se recomienda trabajar a la derecha de este punto.

## 6.4.2 COSTO DEL PROYECTO POR ETÁPAS

En la Figura 56, se observa el comportamiento de construir el proyecto por etapas. Esta opción es una alternativa práctica si se define un valor fijo de la cantidad de energía fotovoltaica óptima que requerirá el sistema de bombeo. En la Tabla 21 se observa a detalle una estimación de los componentes de acuerdo al porcentaje de construcción.

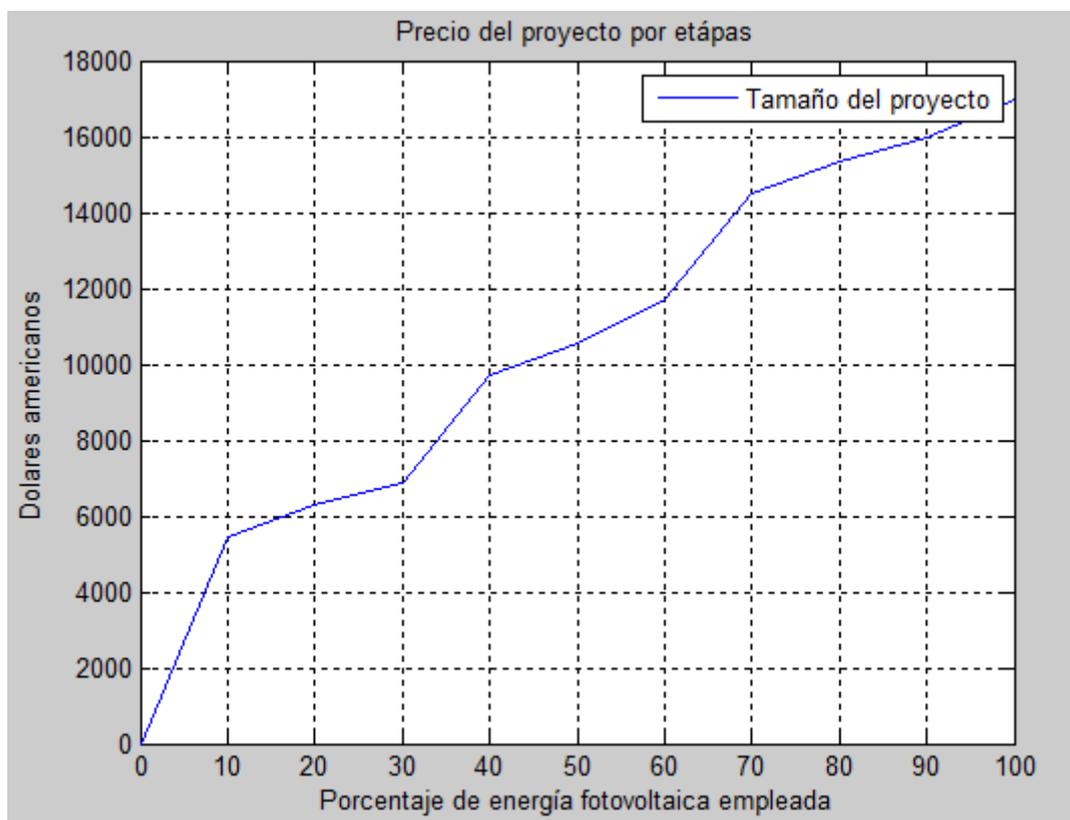


Figura 56 Costos de construcción del proyecto por etapas.

Tabla 21 Detalle de cantidad de elementos de acuerdo a Figura 56.

| % DE        | # DE      | # DE      | # DE     | # DE       | PRECIO      | PRECIO      | PRECIO      | PRECIO      | TOTAL        |
|-------------|-----------|-----------|----------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| INSTALACIÓN | PFV       | BATERÍAS  | C. CARGA | INVERSORES | PFV         | BATERÍAS    | C. CARGA    | INVERSORES  |              |
| <b>10%</b>  | 2         | 4         | 1        | 3          | 424         | 1980        | 541         | 2094        | <b>5445</b>  |
| <b>20%</b>  | 4         | 4         | 1        | 3          | 848         | 1980        | 541         | 2094        | <b>6275</b>  |
| <b>30%</b>  | 5         | 4         | 1        | 3          | 1060        | 1980        | 541         | 2094        | <b>6893</b>  |
| <b>40%</b>  | 7         | 8         | 1        | 3          | 1484        | 3960        | 541         | 2094        | <b>9703</b>  |
| <b>50%</b>  | 9         | 8         | 1        | 3          | 1908        | 3960        | 541         | 2094        | <b>10533</b> |
| <b>60%</b>  | 10        | 8         | 2        | 3          | 2120        | 3960        | 1082        | 2094        | <b>11692</b> |
| <b>70%</b>  | 12        | 12        | 2        | 3          | 2544        | 5940        | 1082        | 2094        | <b>14502</b> |
| <b>80%</b>  | 14        | 12        | 2        | 3          | 2968        | 5940        | 1082        | 2094        | <b>15332</b> |
| <b>90%</b>  | 15        | 12        | 2        | 3          | 3180        | 5940        | 1082        | 2094        | <b>15950</b> |
| <b>100%</b> | <b>18</b> | <b>12</b> | <b>2</b> | <b>3</b>   | <b>3816</b> | <b>5940</b> | <b>1082</b> | <b>2094</b> | <b>16992</b> |

## CONCLUSIONES

En base a los análisis hechos y los resultados obtenidos, se concluye lo siguiente:

- Los motores eléctricos pueden ser perjudicialmente afectados cuando se usan con actuadores de frecuencia variable (AFV). Las formas de onda no senoidales de los VFD's contienen: armónicas que causan calentamiento adicional al motor; picos de tensión alta y tiempo corto de elevación de la tensión, lo que resulta en un incremento en el esfuerzo de los aislamientos, especialmente cuando se usan líneas de alimentación largas. Otros efectos de los VFD's en el funcionamiento de los motores incluyen: reducción en la eficiencia, incremento en la corriente de carga, vibración y ruido. El uso de motores estándar con VFD's deben de limitarse a aquellas consideraciones de aplicación definidas en NEMA MG-1, Parte 30.
- La selección de una bomba no es algo que debe hacerse a la ligera; en diferentes ámbitos, lo adecuado es analizar las características de operación que se requieren y en base a estas, dirigirse a las curvas de los sistemas de bombeo que proporcionan los fabricantes para seleccionar la que se asemeje a los requisitos deseados.
- De igual manera, en la selección de motores para operar en sistemas de bombeo, deben tener las características adecuadas en lo que se refiere a aislamientos, a estos, la norma técnica les llama Motores de Propósito Definido. Esto, debido a los elevados pares de arranques o sobrecalentamiento en el bobinado producido por armónicos y cambios en la corriente que circula por el estator. Además, al acoplarse con un sistema de bombeo, esto añade una componente de carga hidráulica que debe ser tomada en cuenta a la hora de su elección. Esto quiere decir, que la elección correcta del tipo de motor, ahorrará recursos al este estar operando en condiciones idóneas para las cuales este fue diseñado.
- El estudio de los arrancadores progresivos y los variadores de frecuencia, es un tema de suma importancia en la operación de sistemas de bombeo. Hoy en día en la industria salvadoreña, es inevitable encontrarnos con este tipo de sistemas, en los cuales, debido a la economía de las instituciones se busca ahorrar dinero en la medida que más se pueda. El uso de variadores, en lugar de válvulas de estrangulamiento conlleva a una eficiencia de recursos. Esto puede comprobarse con los experimentos propuestos en el anexo de este trabajo de graduación.
- El dimensionamiento de plantas fotovoltaicas para sistemas de bombeo, está en auge, y es que, mover el recurso hídrico cada día es un nuevo reto debido a las distancias que se traducen en fricciones que debe romper, lo que se traduce en energía extra que debe ser empleada. Para operar un motor desde una fuente de alimentación fotovoltaica es necesario tener en cuenta las altas corrientes en el par de arranque del motor, es por ello que es recomendable contar con una red híbrida en conjunción con la distribuidora. Esto quiere decir que, para determinadas situaciones, la distribuidora puede inyectar la energía necesaria y de igual manera, la planta fotovoltaica puede aparecer en determinados momentos.

- A partir del punto anterior, se hizo necesario un estudio de cuánto es la proporción correcta de energía fotovoltaica necesaria para que sea un proyecto rentable en el tiempo. Se calculó que la red híbrida debía tener al menos un 67% de energía fotovoltaica para que fuera atractivo para un inversionista, en lo que se refiere al tiempo estimado de recuperación de su dinero mientras esté el sistema de bombeo operando correctamente. Esto, considerando diferentes escenarios. Por ejemplo, este proyecto es con fines académicos, por lo que el sistema de bombeo no está operando todo el tiempo, lo que conlleva a inyectar a la red la energía generada. Para una aplicación específica de bombeo, en la que la bomba opera 24/7, este mismo estudio técnico puede ser llevado a ese escenario y calcular el porcentaje óptimo de la red híbrida.

## RECOMENDACIONES

El uso de motores de propósito definido es el recomendado por estándares técnicos. Se pueden usar de propósito general; pero no está garantizada la durabilidad de estos.

La selección de la bomba, se basa en el requerimiento de caudal y carga. Se recomienda que el motor deba ser elegido en función de la bomba y no al contrario.

Las tuberías deben ser metálicas, esto por las vibraciones causadas por el motor sobre todo el sistema.

La bomba debe tener todas las válvulas que han sido colocadas en el diseño; ya que funcionan como protecciones hidráulicas para el sistema.

En el análisis económico, debe tomarse en cuenta el pliego tarifario vigente y tomar en cuenta la inflación y el comportamiento de los precios de la energía que se proyecta para los próximos años.

Como recomendación principal se aconseja el uso de sistemas fotovoltaicos para este tipo de instalaciones, a este tipo de generación como se ha mencionado se le conoce como energías limpias, lo que significa que combaten el cambio climático y contribuyen a conservar el medio ambiente, con estos sistemas se logra prevenir al año la emisión de toneladas de CO<sub>2</sub>, con nuestra propuesta se calcula que se logra reducir entre 3 y 4 toneladas de CO<sub>2</sub> anual al medio ambiente.

En la propuesta de este documento se hace referencia al porcentaje de potencia que puede estar suministrando nuestro conjunto de paneles, pero realmente no es muy conveniente que esto se lleve a cabo de esta forma, ya que no es útil en un sistema formal conectado a la red disminuir la potencia generada esto se recomienda hacer solo para fines prácticos de aprendizaje en el laboratorio.

Mantener el sistema de generación fotovoltaico inyectando energía a la red cuando este no suministre la energía a la bomba para darle una mejor utilidad y beneficio.

Nuestra propuesta de alimentación del sistema eléctrico de nuestro banco de pruebas para ensayo con equipos de bombeo logra el objetivo demostrativo y académico de reducir el costo de la tarifa de energía eléctrica considerablemente, el único inconveniente es la elevada inversión inicial, por lo cual se recomienda invertir en un sistema fotovoltaico del tipo con conexión a red, ya que con estos sistemas nos ahorramos el gasto en baterías, reducimos espacio y tiempo de mantenimiento.

Continuar los estudios del comportamiento del sistema fotovoltaico conectado a la red y suministrando la energía al sistema de bombeo en cuanto a los defectos que produce los variadores de frecuencia.

## GLOSARIO TECNICO

### Términos encontrados en apartados de CAPITULO I

**Aislamiento eléctrico:** En el que se impide el paso de la corriente eléctrica

**Armónicos:** Deformación en la forma de onda del voltaje o corriente ocasionadas por cargas no lineales.

**BAR** Unidad métrica de presión atmosférica igual a 14,0 libras por pulgada cuadrada (lb / in<sup>2</sup>), 1,02 kilogramos por centímetro cuadrado (kg / cm<sup>2</sup>), 29,53 pulgadas de mercurio (en Hg) o 0,9869 atmósfera

**Blindajes:** Barreras físicas de protección, utilizadas en sistemas.

**Bomba Centrífuga** Un mecanismo de bombeo que hace girar el agua por medio de un impulsor. El agua es empujada hacia fuera por la fuerza centrífuga

**Bomba de Superficie** Una bomba no sumergible. La misma debe ser ubicada a una distancia no mayor de 6 metros por encima de la superficie del agua del pozo.

**Bomba de Desplazamiento Positivo** Cualquier mecanismo que asegure el agua en una cámara y luego la fuerce hacia fuera reduciendo el volumen de la cámara.

**Campos electromagnéticos:** Es un campo físico, de tipo tensorial, producido por aquellos elementos cargados eléctricamente, que afecta a partículas con carga.

**Carga Dinámica Total** Altura de Elevación + pérdida por fricción en la tubería.

**Carga estática:** Es una acción estacionaria de una fuerza o un momento que actúan sobre cierto objeto

**Caudal** En la bomba es el volumen útil de líquido erogado por la bomba en una unidad de tiempo. Generalmente se indica con Q y se mide en m<sup>3</sup>/s, m<sup>3</sup>/h o en l/min.

**Check Valve - Válvula de retención** Una válvula que permite el flujo de agua en una dirección pero no de la otra.

**Conductor eléctrico:** Es un material que ofrece poca resistencia al movimiento de la carga eléctrica.

**Corriente:** Es el flujo de carga eléctrica por unidad de tiempo que recorre un material.

**Corriente Inrush:** la corriente momentánea que se establece en un circuito en el preciso momento de la conexión, y que dura determinado tiempo

**Componentes simétricas:** Se utiliza para simplificar el análisis de los sistemas de energía trifásicos desequilibrados, pues permite escribir de forma general un sistema polifásico desbalanceado (con n fases) como la suma de n sistemas equilibrados aplicando el principio de superposición.

**Deslizamiento:** Es la diferencia relativa entre la velocidad del campo magnético (velocidad de sincronismo) y la velocidad del rotor.

**Eficiencia:** Es la relación entre la potencia mecánica de salida y la potencia eléctrica de entrada.

**Eficiencia Premium:** Es la eficiencia de los motores que igualan o superan los valores de la eficiencia de la Tabla 6, de acuerdo a su enclaustramiento y número de polos

**Entrehierro:** Al espacio de aire existente entre el estator y el rotor se le denomina entrehierro.

**Estator:** es una parte fija de una máquina rotativa (motor).

**Factor de potencia:** Como la relación entre la potencia activa, P, y la potencia aparente.

**Factor de servicio:** Es un indicador de la capacidad de sobrecarga que puede soportar un motor eléctrico, como ejemplo el valor de 1.1 significa que el motor puede trabajar al 110%

**Frecuencia:** Es una magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico.

**FP:** Indica el desfase entre los vectores representativos de la tensión, a los bornes del motor y de la corriente absorbida por ésta.

**Humedad:** Cantidad de vapor de agua contenida en el aire en cualquier momento determinado.

**IEEE:** Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Ingenieros Electrónicos y Electricistas).

**Impedancia:** Resistencia aparente de un circuito dotado de capacidad y autoinducción al flujo de una corriente eléctrica alterna.

**Interferencias electromagnéticas:** Es cualquier señal o emisión, radiada en el espacio o conducida a través de un cable de alimentación o señal.

**Letra de diseño:** Es la letra que identifica las características de corriente de arranque, par de arranque, par máximo y par mínimo de un motor.

**Leyes de afinidad** Expresan la relación matemática entre varias variables involucradas en el rendimiento de las bombas. Se aplican a todos tipos de bombas centrífugas y de flujo axial. Éstas son las siguientes: Q = Capacidad, GPM H = Carga total, pies BHP = Potencia al freno N = Velocidad de la bomba, RPM D = Diámetro del impulsor (pulg.)

**Motobomba:** Bomba aspirante e impelente que funciona por medio de un motor eléctrico o de explosión acoplado a ella.

**Motor vertical:** Es aquel cuya posición de instalación debe ser con su eje de rotación perpendicular al plano de montaje.

**NEC:** Código eléctrico nacional.

**NPSH** Este parámetro indica la incapacidad de la bomba de crear el vacío absoluto, o sea la incapacidad de todas las bombas centrífugas de aspirar a una altura igual o superior a 10,33 m (que corresponde generalmente al valor de la presión atmosférica al nivel del mar).

**Norma NEMA:** (National Electrical Manufacturers Association) es el responsable de los estándares industriales comunes usados en el campo de la electricidad. Entre otros, la NEMA ha establecido una amplia gama de estándares para encapsulados de equipos eléctricos

**Mediciones eléctricas:** Son los métodos, dispositivos y cálculos usados para medir cantidades eléctricas.

**Motor eléctrico:** Es un dispositivo que transforma la energía eléctrica en energía mecánica por medio de la acción de los campos magnéticos generados.

**Par de arranque:** El par de arranque o a rotor bloqueado es el torque que el motor desarrolla cuando deja de estar parado.

**Par Máximo:** Es el máximo torque que desarrolla el motor, es usualmente expresado como un porcentaje del torque a plena carga. El par máximo de los motores ordinarios varía entre 1.5 y 3 veces del par de plena carga.

**Potencia mecánica:** La potencia mecánica es la potencia transmitida mediante la acción de fuerzas físicas de contacto o elementos mecánicos asociados como palancas, engranajes, etc.

**Presión:** Fuerza o empuje que se ejerce sobre una cosa.

**Presión atmosférica:** Fuerza que ejerce la atmosfera que rodea la tierra sobre todos los objetos que se hallan en contacto con ella.

**Psi** Medida de presión en libras por pulgada cuadrada (por sus siglas en inglés pounds per square inch) Levantamiento o caída vertical en pies / 2,31 pies = 1 psi = 703,1 kg/m<sup>2</sup>.

**PWM:** Modulación por Ancho de Pulsos (también conocida como PWM, siglas en inglés de pulse-width modulation) de una señal o fuente de energía es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica.

**Requerimientos ambientales:** Condiciones o valores de parámetros ambientales que se deben cumplir en determinada situación.

**Resistividad:** Resistencia proporcional de un material conductor según su longitud y anchura.

**Rendimiento** El porcentaje de potencia que es convertido a trabajo útil. Ejemplo: Una bomba de agua con un rendimiento de 60% convierte 60% de la energía de entrada en trabajo - bombeo de agua. El 40% restante se pierde en forma de calor.

**Rodete:** Es un tipo de rotor situado dentro de una tubería o un conducto y encargado de impulsar un fluido.

**Secuencia positiva negativa y cero:** Físicamente, en un sistema trifásico, un conjunto de corrientes positivas producen un campo rotatorio normal, un conjunto de corrientes negativas producen un campo con rotación opuesta y la secuencia cero produce un campo que oscila pero no gira.

**Transductores de Presión:** son aquellas partes de una cadena de medición que transforman una magnitud física en una señal eléctrica.

**Sensor:** es un objeto capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, y transformarlas en variables eléctricas.

**Variador de frecuencia (VFD ó VSD):** Dispositivo electrónico, que permite el control de motores eléctricos.

**Velocidad** La velocidad de rotación es el número de vueltas cumplidas por la bomba en una unidad de tiempo; generalmente se indica con  $n$  y se mide rpm.

**Vibraciones:** Movimiento de un cuerpo sólido alrededor de una posición de equilibrio.

**Voltaje** La medida de la potencia eléctrica.

## Términos encontrados en apartados de CAPITULO II

**Amperio hora:** Es una unidad de carga eléctrica, indica la cantidad de carga eléctrica que pasa por los terminales de una batería, si ésta proporciona una corriente eléctrica de 1 amperio durante 1 hora.

**Batería de ciclo profundo:** Batería especialmente diseñada para operar en ciclado de profundidad superior a 50%. No se debe utilizar una batería de propósitos generales cuando los ciclos son profundos, estas baterías poseen placas reforzadas para evitar su agotamiento prematuro y poder soportar mejor la exigencia del ciclado.

**Constante Solar:** Es la radiación sobre una superficie orientada normalmente a la dirección de los rayos solares y situada fuera de la atmósfera terrestre a la distancia astronómica unidad igual a  $1.495 \times 10^{11} \text{m}$  que es la distancia media Sol-Tierra. No es una verdadera constante pues varía ligeramente, 0.1% a 0.2%, respecto de su valor central, Se aceptara a partir de ahora como  $ISC=1370 \text{ W/m}^2$ .

**Corriente en Máxima Potencia:** La corriente eléctrica que producirá en un funcionamiento perfecto con el sol incidiendo de forma perpendicular encima de la superficie de la placa. A lo largo del día la intensidad de corriente variará ya que los rayos del sol no incidirán con el mejor ángulo hasta el mediodía.

**Corriente por Corto-Circuito:** Es la corriente máxima que producirá el panel en una situación de anomalía de funcionamiento del panel cuando exista un cortocircuito. Este valor se suele utilizar para determinar el tamaño de cable de la instalación, así como para dimensionar a medida las protecciones y los fusibles de esta parte de la instalación solar.

**Eficiencia:** En lo que respecta a células solares es el porcentaje de energía solar que es transformada en energía eléctrica por la célula. En función de la tecnología y la producción técnica, éste varía entre un 5% y un 30%.

**Horas Sol Pico:** Es la unidad utilizada para medir la irradiación solar y definida como el tiempo en horas de una hipotética irradiancia solar constante de  $1000 \text{ W/m}^2$ . Es utilizada en el dimensionado de sistemas fotovoltaicos.

**Inversor:** Transforma la corriente continua que suministran las baterías o los paneles en corriente alterna para su uso en diferentes electrodomésticos o aplicaciones, tanto en sistemas aislados como en sistemas conectados a red.

**Kilovatio (kW):** Unidad de potencia equivalente a 1000 vatios

**Panel Fotovoltaico:** Es el conjunto formado por las distintas células fotovoltaicas interconectadas, encapsuladas y protegidas por un vidrio en su cara anterior y por un marco por los laterales.

**Polución:** Contaminación intensa y dañina del agua o del aire, producida por los residuos de procesos industriales o biológicos.

**Profundidad de descarga:** Significa cuánto de energía se extrae de una batería. Una batería que se someta a una profundidad de descarga de 30%, vivirá más que una que se somete a una de 80%.

**Regulador de Carga** Dispositivo encargado de proteger a la batería frente a sobrecargas y sobredescargas profundas. El regulador de tensión controla constantemente el estado de carga de las baterías y regula la intensidad de carga de las mismas para alargar su vida útil.

**Rendimiento:** Es la relación que existe entre la energía que realmente transforma en energía útil y la que requiere un determinado equipo para su funcionamiento.

**Régimen de descarga C20:** Descarga en 20 horas, usado para baterías de arranque, detalla la capacidad total en 20 de descarga "Es decir" una batería con una autonomía de 20 horas de descarga.

**Sistema Conectado a Red:** Sistema fotovoltaico en el que actúa como una central generadora de electricidad, suministrando energía a la red.

**Sistema Híbrido:** Sistema fotovoltaico que incluye otras fuentes que generan electricidad, tales como generadores eólicos o grupos electrógenos.

**Unidad Astronómica:** Es una unidad de longitud igual por definición a 149 597 870 700 metros, y que equivale aproximadamente a la distancia media entre el planeta Tierra y el Sol.

**Voltaje en circuito abierto:** En un panel se refiere a la tensión de salida de un panel cuando no haya ninguna carga.

**Voltaje en Máxima Potencia:** Es el voltaje que generará la placa solar cuando esté funcionando al máximo de su rendimiento. El valor VMP irá en paralelo con el IMP. Ya que los dos ascenderán o bajarán según la cantidad de radiación solar que reciba el panel fotovoltaico.

**Watt pico:** Máxima potencia que un dispositivo produce o consume durante su arranque.

# BIBLIOGRAFIA

## Bibliografía CAPITULO I

- [1] Notas de clase de Conversión de energía Electromecánica, CEE-115 (Motores), Ing. Armando Martínez Calderón, Universidad de El Salvador
- [2] Máquinas Eléctricas – 3ra Edición – Cap. 9 Stephen Chapman
- [3] “NEMA MG-1 motors and generators” NEMA standars publications 2009.
- [4] Paper “Study of voltage harmonic distortion effect over three-phase induction motor operation on steady state condition” Diego Valencia , Enrique Quispeb\*, Vladimir Sousac
- [5] Paper "Fundamentos de Electricidad y Magnetismo" Israel Ricardo Bernal Sánchez
- [6] “Términos y condiciones generales al consumidor final, del pliego tarifario del año 2016.”, SIGET
- [7] IEEE std. 519-2014 - Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems
- [8] “Bombas, selección, uso, y mantenimiento”, J. Kenneth
- [9] Bombas. Su Selección y Aplicación. Tyler G. Hicks. Editorial Continental
- [10] Libro hidráulica de tuberías de Juan Saldarriaga
- 11] “Selección y aplicación de variadores de velocidad” WEG equipamientos eléctricos S.A
- [12] “Application guide for AC adjustable speed drive systems” NEMA standars publications 2001. ⌘ [13] “Altivar 61 variable
- [13] “Holloshaft motors for new DOE standars vertical AC motors, high thrust inverter duty and sine wave optimized Premium efficient” U.S motors.
- [14] Cabezales de accionamiento para bombas Cap. 12
- [15] “Altivar 61 variable speed drives for synchronous and asynchronous motors programming manual” Schneider electric 2013.
- [16] Selección de bomba y cálculo de BHP  
[http://www.nationalpumpcompany.com/catalog\\_national\\_pump.htm](http://www.nationalpumpcompany.com/catalog_national_pump.htm)
- [17] Selección de motor vertical para bomba 5HP inverter Duty de eje hueco  
[http://www.turevmuhendislik.com/images/urunler/gemotor/ge\\_pompa\\_motorlari.pdf](http://www.turevmuhendislik.com/images/urunler/gemotor/ge_pompa_motorlari.pdf)
- [18] “Energy saver premium efficient VHS” GE Power Conversion  
IEC 60034-17  
<http://www.teias.gov.tr/IEC/iec60034-17%7Bed3.0%7Db.pdf>
- [19] Siemen Application Manual Inverter Duty AC Induction Motors

## Bibliografía CAPITULO II

[1] (Energía Solar) [Online] Disponible:  
<http://www.gstriatum.com/energiasolar/>

[2] (Historia de la Energía Solar) [Online] Disponible:  
<http://energiasolar.mx/inventos/historia-energia-solar.html>

[3] (Energía Solar, PV Education) [Online] Disponible:  
<http://www.pveducation.org/pvcdrom>

[4] (El Sol, Astronomía Educativa) [Online] Disponible:  
<http://www.astromia.com/solar/sol.htm>

[5] (Estructura y composición del sol, Astronomía Educativa) [Online] Disponible:  
<http://www.astromia.com/solar/estrucsol.htm>

[6] (Curso solar, Universidad de JAEN) [Online] Disponible:  
[https://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home\\_main\\_frame/02\\_radiacion/01\\_basi-co/2\\_radiacion\\_01.htm](https://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/02_radiacion/01_basi-co/2_radiacion_01.htm)

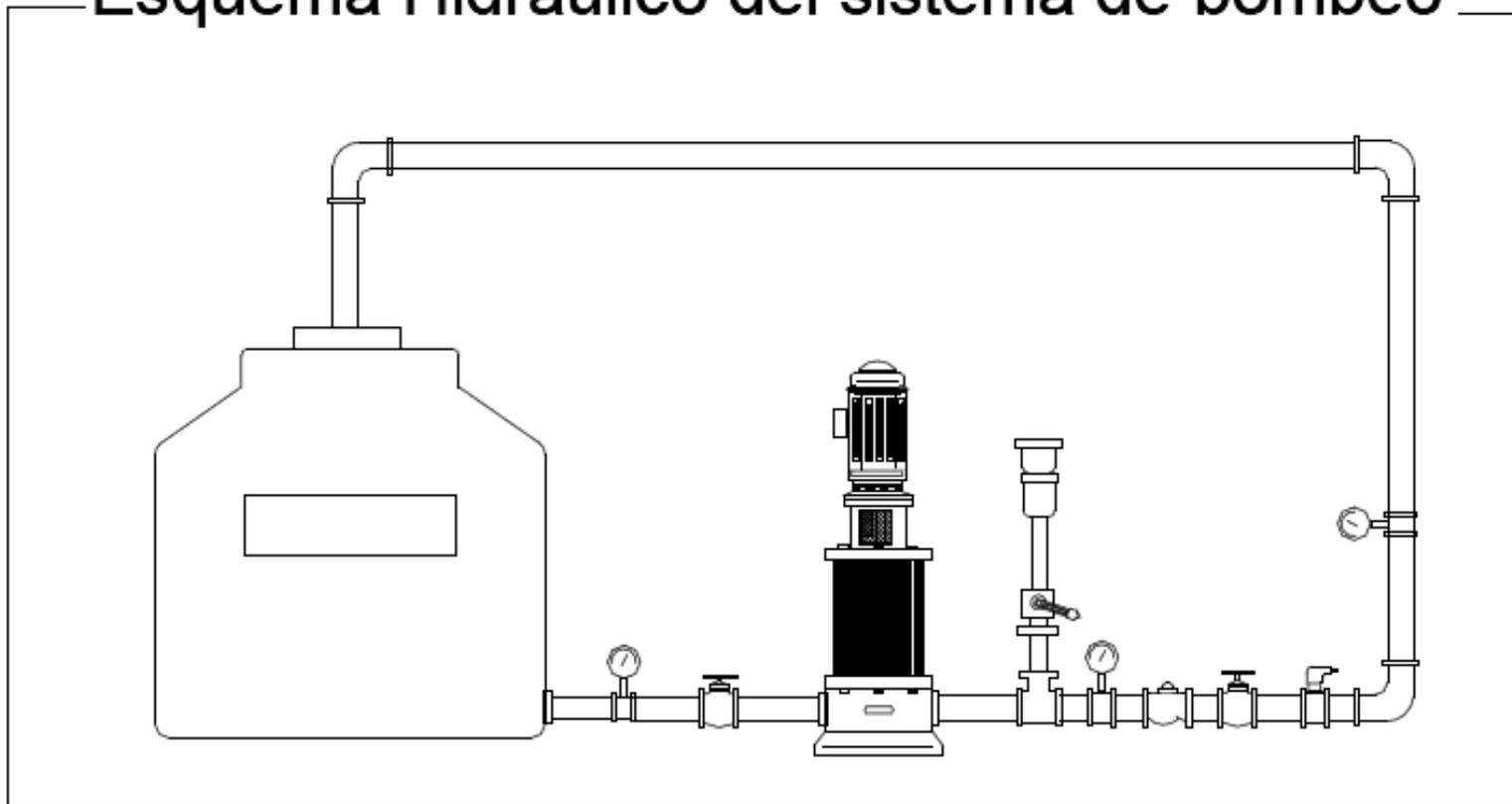
[7] (Ventanas al Universo, La Tierra) [Online] Disponible:  
<https://www.windows2universe.org/earth/earth.html&lang=sp>

[8] (Astronomía Educativa, Los movimientos de la Tierra) [Online] Disponible:  
<http://www.astromia.com/tierraluna/movtierra.htm>

[9] (Damia Solar, El efecto fotovoltaico) [Online] Disponible:  
[http://www.damiasolar.com/actualidad/blog/articulos-sobre-la-energia-solar-y-sus-componentes/funcionamiento-efecto-fotovoltaico\\_1](http://www.damiasolar.com/actualidad/blog/articulos-sobre-la-energia-solar-y-sus-componentes/funcionamiento-efecto-fotovoltaico_1)

# ANEXOS

## Esquema Hidráulico del sistema de bombeo



Esquema hidráulico de banco de Prueba para determinación de la eficiencia de una bomba controlada con VFD.

Presentan:  
Hernandez Martinez Cesar Amilcar  
Gonzalez Castillo Samuel Sebastian  
Gonzalez Valle Rafael Ernesto

Imagen Anexo1 Esquema de propuesta de montaje para sistema de bombeo hidráulico.

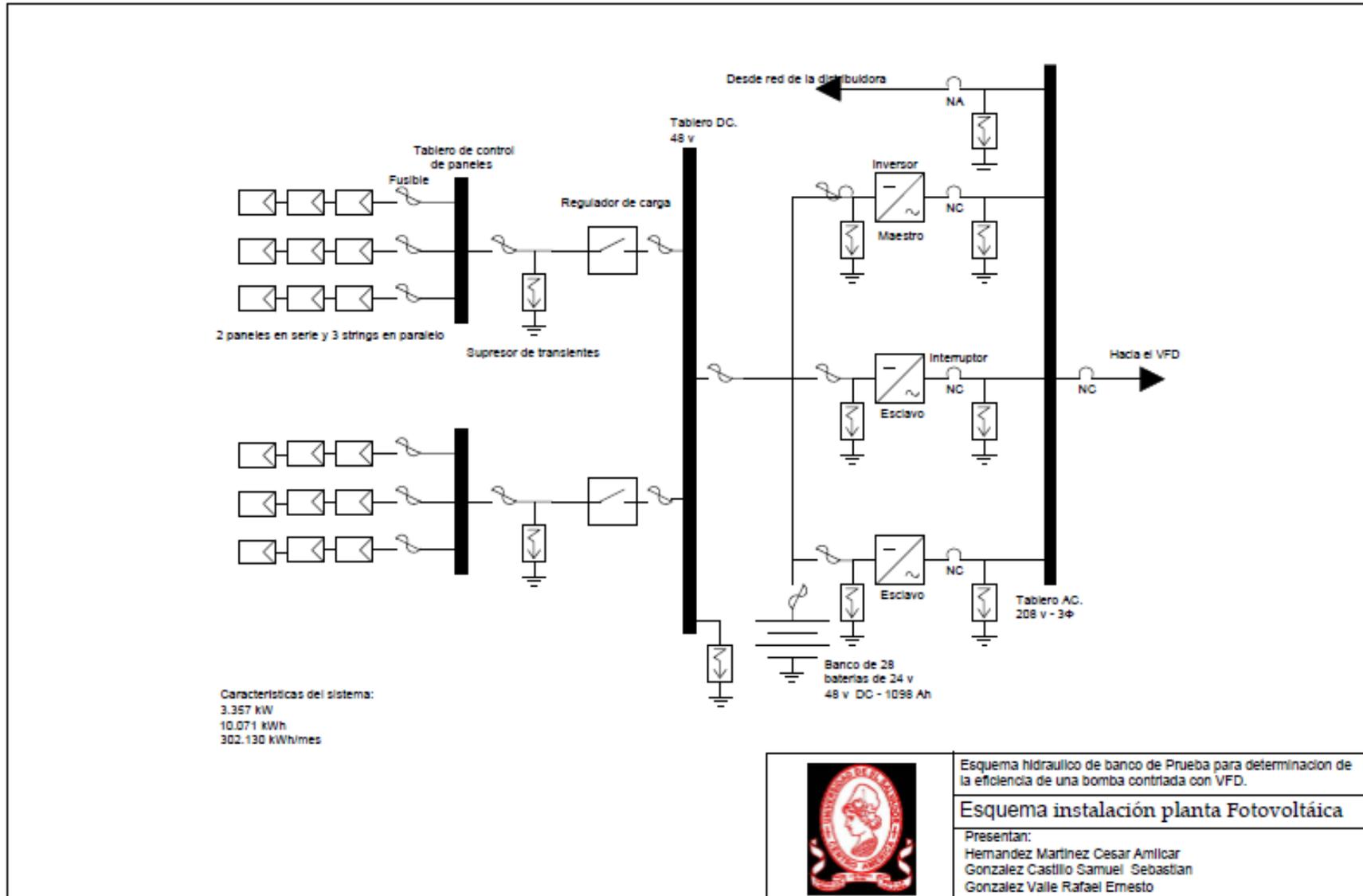


Imagen Anexo 2 Esquema de propuesta de montaje para sistema Fotovoltaico de 5kW de capacidad.

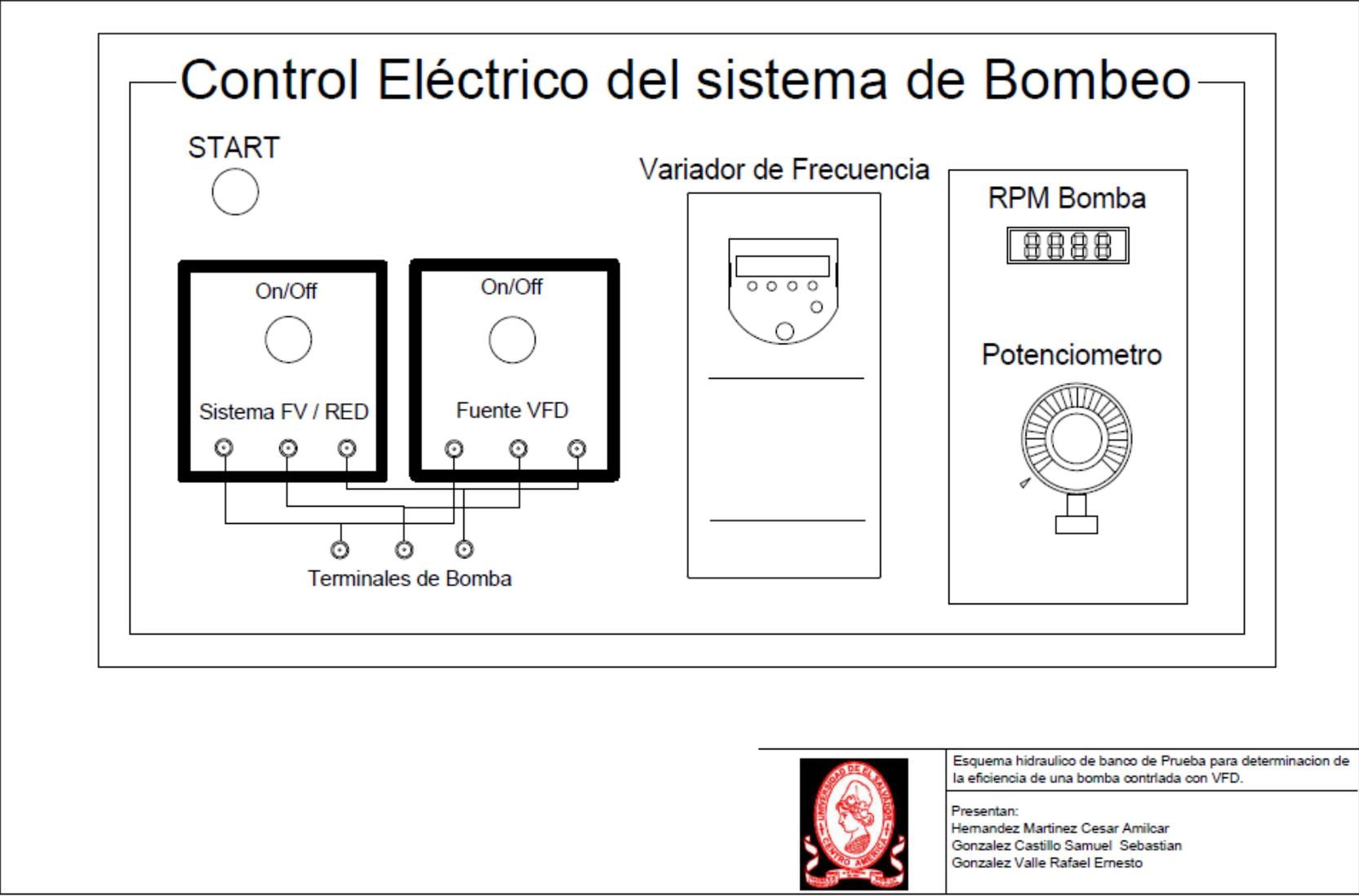
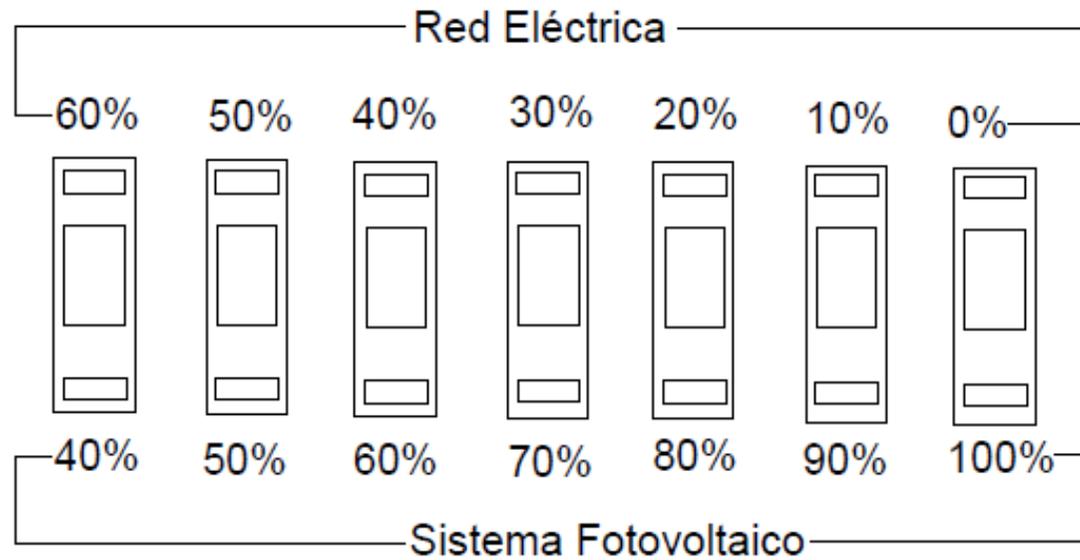


Imagen Anexo 3 Esquema de propuesta de montaje de sistema de control de la bomba mediante el variador de Frecuencia



Imagen Anexo 4 Esquema de propuesta de montaje de sistema de control de la curva del sistema mediante válvula de estrangulamiento

## Control de la Potencia utilizada SF / Red Electrica



Esquema hidraulico de banco de Prueba para determinacion de la eficiencia de una bomba contriada con VFD.

Presentan:  
Hernandez Martinez Cesar Amilcar  
Gonzalez Castillo Samuel Sebastian  
Gonzalez Valle Rafael Ernesto

Imagen Anexo 5 Esquema propuesto de montaje para módulo de control de la

Tabla Anexo 6 Tabla de selección de cabezales con eje hueco (cortesía de U.S. MOTORS)

TABLA 12.1  
 TABLA DE SELECCION PARA CABEZALES DE EJE HUECO  
 (Cortesía de "U.S. MOTORS")

| MODELO | BOMBA |     | CAP. EMPUJE |       | RELACION DE REDUCCION Y VELOCIDAD DEL MOTOR |       |      |      |      |      |      |      |     |      |       |      |      |      |      |      |
|--------|-------|-----|-------------|-------|---|-------|------|------|------|------|------|------|-----|------|-------|------|------|------|------|------|
|        | RPM   | HP  | STD         | EHT   | 1:1   | 10:11 | 5:6  | 4:5  | 3:4  | 2:3  | 4:7  | 1:2  | 1:3 | 6:5  | 11:10 | 4:3  | 3:2  | 2:1  | 3:1  | 5:4  |
| 21     | 1160  | 15  | 2350        | NA    | 1160  | -     | -    | -    | 870  | 773  | -    | 580  | -   | -    | -     | 1547 | 1740 | -    | -    | -    |
|        | 1460  | 17  | 2200        | NA    | 1460  | -     | -    | -    | 1095 | 974  | -    | 730  | -   | -    | -     | 1946 | 2190 | -    | -    | -    |
|        | 1760  | 20  | 2050        | NA    | 1760  | -     | -    | -    | 1320 | 1174 | -    | 880  | -   | -    | -     | 2346 | 2640 | -    | -    | -    |
|        | 3460  | 32  | 1650        | NA    | 3460  | -     | -    | -    | 2595 | 2306 | -    | 1730 | -   | -    | -     | -    | -    | -    | -    | -    |
| 40     | 1160  | 30  | 3550        | 5520  | 1160  | 1055  | 967  | -    | 870  | 773  | 663  | 580  | -   | 1392 | -     | 1547 | 1740 | 2320 | 3480 | -    |
|        | 1460  | 35  | 3300        | 5088  | 1460  | 1309  | 1217 | -    | 1095 | 973  | 834  | 730  | -   | 1752 | -     | 1947 | 2190 | 2920 | -    | -    |
|        | 1760  | 40  | 3100        | 4800  | 1760  | 1578  | 1467 | -    | 1320 | 1173 | 1006 | 880  | -   | 2112 | -     | 2347 | 2640 | 3520 | -    | -    |
|        | 3460  | 45  | 2500        | -     | 3460  | 3145  | 2883 | -    | 2595 | 2307 | 1977 | 1730 | -   | -    | -     | -    | -    | -    | -    | -    |
| 60     | 1160  | 45  | 4700        | 6900  | 1160  | 1040  | 967  | 928  | 870  | 773  | 663  | 580  | 387 | 1392 | 1276  | 1547 | 1740 | 2320 | 3480 | -    |
|        | 1460  | 53  | 4350        | 6360  | 1460  | 1314  | 1217 | 1168 | 1095 | 973  | 834  | 730  | 487 | 1752 | 1606  | 1947 | 2190 | 2920 | -    | 1825 |
|        | 1760  | 60  | 4100        | 6000  | 1760  | 1584  | 1467 | 1408 | 1320 | 1173 | 1006 | 880  | 587 | 2112 | 1936  | 2347 | 2640 | 3520 | -    | 2200 |
|        | 3460  | 60  | 3300        | NA    | 3460  | 3145  | 2883 | 2768 | 2595 | 2307 | 1977 | 1730 | -   | -    | -     | -    | -    | -    | -    | -    |
| 80     | 960   | 52  | 7130        | 11224 | 960   | 873   | 800  | 768  | 720  | 640  | 549  | 480  | -   | 1152 | 1056  | 1280 | 1440 | -    | -    | 1200 |
|        | 1160  | 60  | 6750        | 10580 | 1160  | 1040  | 967  | 928  | 870  | 773  | 663  | 580  | -   | 1392 | 1276  | 1547 | 1740 | -    | -    | 1450 |
|        | 1460  | 70  | 6250        | 9750  | 1460  | 1314  | 1217 | 1168 | 1095 | 973  | 834  | 730  | -   | 1752 | 1606  | 1947 | 2190 | -    | -    | 1825 |
|        | 1760  | 80  | 5850        | 9200  | 1760  | 1584  | 1467 | 1408 | 1320 | 1173 | 1006 | 880  | -   | 2112 | 1936  | 2347 | 2640 | -    | -    | 2200 |
| 100    | 960   | 65  | 7130        | 11224 | 960   | 873   | 800  | 768  | 720  | 640  | 549  | 480  | -   | 1152 | 1056  | 1280 | 1440 | -    | -    | 1200 |
|        | 1160  | 74  | 6750        | 10580 | 1160  | 1040  | 967  | 928  | 870  | 773  | 663  | 580  | -   | 1392 | 1276  | 1547 | 1740 | -    | -    | 1450 |
|        | 1460  | 89  | 6250        | 9750  | 1460  | 1314  | 1217 | 1168 | 1095 | 973  | 834  | 730  | -   | 1752 | 1606  | 1947 | 2190 | -    | -    | 1825 |
|        | 1760  | 100 | 5850        | 9200  | 1760  | 1584  | 1467 | 1408 | 1320 | 1173 | 1006 | 880  | -   | 2112 | 1936  | 2347 | 2640 | -    | -    | 2200 |
| 125    | 960   | 82  | 8780        | NA    | 960   | 873   | 800  | 768  | 720  | 640  | 549  | 480  | -   | 1152 | 1056  | 1280 | 1440 | 1920 | 2880 | 1200 |
|        | 1160  | 94  | 8280        | NA    | 1160  | 1040  | 967  | 928  | 870  | 773  | 663  | 580  | -   | 1392 | 1276  | 1547 | 1740 | 2320 | 3480 | 1450 |
|        | 1460  | 110 | 7632        | NA    | 1460  | 1314  | 1217 | 1168 | 1095 | 973  | 834  | 730  | -   | 1752 | 1606  | 1947 | 2190 | 2920 | -    | 1825 |
|        | 1760  | 125 | 7200        | NA    | 1760  | 1584  | 1467 | 1408 | 1320 | 1173 | 1006 | 880  | -   | 2112 | 1936  | 2347 | 2640 | 3520 | -    | 2200 |
| 152    | 960   | 98  | 8780        | 15250 | 960   | 873   | 800  | 768  | 720  | 640  | 549  | 480  | 320 | 1152 | 1056  | 1280 | 1440 | 1920 | 2880 | 1200 |
|        | 1160  | 112 | 8280        | 14375 | 1160  | 1040  | 967  | 928  | 870  | 773  | 663  | 580  | 387 | 1392 | 1276  | 1547 | 1740 | 2320 | 3480 | 1450 |
|        | 1460  | 132 | 7632        | 13250 | 1460  | 1314  | 1217 | 1168 | 1095 | 973  | 834  | 730  | 487 | 1752 | 1606  | 1947 | 2190 | 2920 | -    | 1825 |
|        | 1760  | 150 | 7200        | 12500 | 1760  | 1584  | 1467 | 1408 | 1320 | 1173 | 1006 | 880  | 587 | 2112 | 1936  | 2347 | 2640 | 3520 | -    | 2200 |
| 200    | 960   | 131 | 8780        | 15250 | 960   | 873   | 800  | 768  | 720  | 640  | 549  | 480  | 320 | 1152 | 1056  | 1280 | 1440 | 1920 | 2880 | 1200 |
|        | 1160  | 150 | 8280        | 14375 | 1160  | 1040  | 967  | 928  | 870  | 773  | 663  | 580  | -   | 1392 | 1276  | 1547 | 1740 | -    | 3480 | 1450 |
|        | 1460  | 176 | 7632        | 13250 | 1460  | 1314  | 1217 | 1168 | 1095 | 973  | 834  | 730  | -   | 1752 | 1606  | 1947 | 2190 | -    | -    | 1825 |
|        | 1760  | 200 | 7200        | 12500 | 1760  | 1584  | 1467 | 1408 | 1320 | 1173 | 1006 | 880  | -   | 2112 | 1936  | 2347 | 2340 | -    | -    | 2200 |

Tabla Anexo 7 Tabla pliegos actualizados Enero 2017

**SUPERINTENDENCIA GENERAL DE ELECTRICIDAD Y TELECOMUNICACIONES**

**TARIFAS**

**PRECIOS MAXIMOS PARA EL SUMINISTRO ELECTRICO  
VIGENTES A PARTIR DEL 15 DE OCTUBRE DE 2016**

**L. PEQUEÑAS DEMANDAS (0 < kW < 10)**

**BAJA TENSION**

**a) Tarifa Residencial para consumos menores de 99 kWh/mes - BT**

**Bloque 1: Primeros 99 kWh/mes**

|                            | CAESS    | DEL SUR  | CLESA    | EEO      | DEUSEM   | EDESAL   | B&D      | ABRUZZO  |
|----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Cargo de Comercialización: |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Cargo Fijo US\$/Usuario-m  | 0.859797 | 0.964976 | 0.817828 | 0.927061 | 0.923664 | 2.008046 | 0.955566 | 0.857713 |
| Cargo de Energía:          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Cargo Variable US\$/kWh    | 0.119677 | 0.122373 | 0.122392 | 0.122773 | 0.123301 | 0.122135 | 0.111500 | 0.113873 |
| Cargo de Distribución:     |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Cargo Variable US\$/kWh    | 0.029863 | 0.049493 | 0.061462 | 0.067449 | 0.076337 | 0.083347 | 0.037410 | 0.036765 |

**Bloque 2: Consumos entre 100 kWh/mes y 199 kWh/mes**

|                            | CAESS    | DEL SUR  | CLESA    | EEO      | DEUSEM   | EDESAL   | B&D      | ABRUZZO  |
|----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Cargo de Comercialización: |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Cargo Fijo US\$/Usuario-m  | 0.859797 | 0.964976 | 0.817828 | 0.927061 | 0.923664 | 2.008046 | 0.955566 | 0.857713 |
| Cargo de Energía:          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Cargo Variable US\$/kWh    | 0.119623 | 0.122107 | 0.122267 | 0.122473 | 0.123292 | 0.120429 | 0.111824 | 0.113552 |
| Cargo de Distribución:     |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Cargo Variable US\$/kWh    | 0.032604 | 0.059292 | 0.027173 | 0.034865 | 0.036089 | 0.071333 | 0.033156 | 0.040241 |

**Bloque 3: Consumos mayores o iguales a 200 kWh/mes**

|                            | CAESS    | DELSUR   | CLESA    | EEO      | DEUSEM   | EDESAL   | B&D      | ABRUZZO  |
|----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Cargo de Comercialización: |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Cargo Fijo US\$/Usuario-m  | 0.859797 | 0.964976 | 0.817828 | 0.927061 | 0.923664 | 2.008046 | 0.955566 | 0.857713 |
| Cargo de Energía:          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Cargo Variable US\$/kWh    | 0.119620 | 0.122027 | 0.122263 | 0.122368 | 0.123277 | 0.120514 | 0.111783 | 0.113405 |
| Cargo de Distribución:     |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Cargo Variable US\$/kWh    | 0.041255 | 0.069556 | 0.077414 | 0.077431 | 0.077294 | 0.077098 | 0.035007 | 0.041892 |

**Uso General**

|                            | CAESS    | DELSUR   | CLESA    | EEO      | DEUSEM   | EDESAL   | B&D      | ABRUZZO  |
|----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Cargo de Comercialización: |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Cargo Fijo US\$/Usuario-m  | 0.859797 | 0.964976 | 0.817828 | 0.927061 | 0.923664 | 2.008046 | 0.955566 | 0.857713 |
| Cargo de Energía:          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Cargo Variable US\$/kWh    | 0.119728 | 0.122117 | 0.122427 | 0.122610 | 0.123458 | 0.120101 | 0.112246 | 0.113604 |
| Cargo de Distribución:     |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Cargo Variable US\$/kWh    | 0.033298 | 0.041203 | 0.038761 | 0.058856 | 0.058338 | 0.062012 | 0.034600 | 0.033141 |

**Alumbrado Público**

|                            | CAESS    | DELSUR   | CLESA    | EEO      | DEUSEM   | EDESAL   | B&D      | ABRUZZO  |
|----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Cargo de Comercialización: |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Cargo Fijo US\$/Usuario-m  | 0.859797 | 0.964976 | 0.817828 | 0.927061 | 0.923664 | 2.008046 | 0.955566 | 0.857713 |
| Cargo de Energía:          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Cargo Variable US\$/kWh    | 0.099762 | 0.097722 | 0.093885 | 0.094615 | 0.091698 | 0.118110 | 0.110054 | 0.110372 |
| Cargo de Distribución:     |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Cargo Variable US\$/kWh    | 0.034534 | 0.050428 | 0.062315 | 0.072441 | 0.071260 | 0.060299 | 0.041448 | 0.033161 |

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**  
**CONVERSIÓN DE ENERGÍA ELECTROMECÁNICA II**  
**PRÁCTICA DE LABORATORIO**

**ANÁLISIS DE DESEMPEÑO EN SISTEMA DE BOMBEO CON  
VÁLVULAS DE CONTROL Y VARIADOR DE FRECUENCIA.**

### **1. OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA**

- Identificar el punto de operación en la gráfica del sistema de una bomba.
- Evaluar el desempeño del motor y de la bomba cuando el caudal es controlado por una válvula y cuando lo es por medio de un variador de frecuencia.
- Aprender lo básico sobre la programación de un variador de frecuencia.
- Investigar en base a normas técnicas, las características de un motor para operar bajo el control de un variador de frecuencia.
- Verificar cómo está implementado una red híbrida para el funcionamiento adecuado de un sistema de bombeo.

### **2. FUNDAMENTOS**

El uso de dispositivos de velocidad variable en sistemas de bombeo puede ser motivado no solo por la necesidad de ajustar la salida de la bomba al suministro o la demanda, sino también por los beneficios económicos, primeramente relacionados con el ahorro en la energía y el mantenimiento y aumento de la confiabilidad. Otros beneficios son la reducción de transitorios hidráulicos, en la medida en que las bombas de velocidad variable sean arrancadas y paradas suavemente, la reducción en fugas de un sistema, por el hecho de operar a presión reducida, y los beneficios asociados con mejor control de la operación de bombeo.

#### **EFICIENCIA DEL SISTEMA MOTOR-VARIADOR-BOMBA**

La eficiencia de las bombas es un indicador de gran relevancia para evaluar el desempeño de un sistema de bombeo; ésta, además, permite determinar si la bomba (configuración variador-motor-bomba) es la adecuada para el sistema en particular. La eficiencia en conjunto es un indicador fácil de medir, en comparación con la medición de la eficiencia de cada uno de los componentes de la bomba de manera individual para diferentes puntos de operación del sistema. Con el resultado de eficiencia de la bomba, se puede iniciar una tarea de diagnóstico de desempeño del sistema de bombeo. La eficiencia de una bomba se puede determinar mediante la relación:

$$\eta = \frac{P_{hidráulica}}{P_{eléctrica}} \times 100(1)$$

La potencia hidráulica es la energía por unidad de tiempo efectiva entregada por la bomba al sistema. La potencia eléctrica activa es la energía por unidad de tiempo consumida por el motor que opera la bomba del sistema. El cálculo de la potencia hidráulica, se hace con la siguiente ecuación:

$$P_{hidráulica} = Q \times H(2)$$

En esta ecuación:

*Q*: Caudal o flujo conducido por la línea.  
*H*: Carga total de bombeo.

La carga total de bombeo (*H*) de una bomba rotodinámica, es la energía adicionada al fluido, a la descarga. La carga de bombeo se puede interpretar como la diferencia entre la carga de descarga y la carga de succión.

En esta medida:

$$H = \text{Carga a la descarga} - \text{Carga a la succión} (3)$$

Las cargas de descarga y succión son las lecturas de presión de los instrumentos ubicados a la succión y descarga de la bomba respectivamente, y corregidas a la línea de centro de la bomba.

La carga total (*H*) de una bomba se calcula aplicando la ecuación de Bernoulli sobre el sistema hidráulico.

$$\frac{P_1}{\Gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + H_B = \frac{P_2}{\Gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + H_p(4)$$

*Donde:*

*P<sub>n</sub>* = Presión

*v<sub>n</sub>* = Velocidad

*z<sub>n</sub>* = Altura

*H<sub>B</sub>* = Carga total de la bomba

*H<sub>p</sub>* = Perdidas en el sistema

La potencia eléctrica consumida por el motor, es únicamente la potencia activa y, es de recordar que para motores trifásicos, esta se calcula mediante la ecuación:

$$P_{el\u00e9ctrica} = \sqrt{(3)} \times V \times I \times FP(5)$$

A partir de la ecuaci\u00f3n (4) tambi\u00e9n se puede predecir el comportamiento aproximado de la bomba al variar algunos de sus par\u00e1metros con las ecuaciones de afinidad

$$Flujoocaudal = \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \text{ Presi\u00f3n} = \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \text{ Potencia} = \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 (6)$$

Donde:

- $Q_1 = \text{Caudal nominal}$
- $Q_2 = \text{Caudal reducido}$
- $H_1 = \text{Presi\u00f3n nominal}$
- $H_2 = \text{Presi\u00f3n reducida}$
- $P_1 = \text{Potencia nominal}$
- $P_2 = \text{Potencia reducida}$
- $n_1 = \text{Velocidad nominal}$
- $n_2 = \text{Velocidad reducida}$

### DATOS DE LA BOMBA EMPLEADA EN ESTA PR\u00c1CTICA

En el gr\u00e1fico siguiente se se\u00f1ala el punto de operaci\u00f3n elegido en base a las necesidades de dise\u00f1o. Con las ecuaciones (7), (8) y (9) se puede calcular la potencia al freno, el caballaje del motor y la potencia el\u00e9ctrica requerida para su funcionamiento.

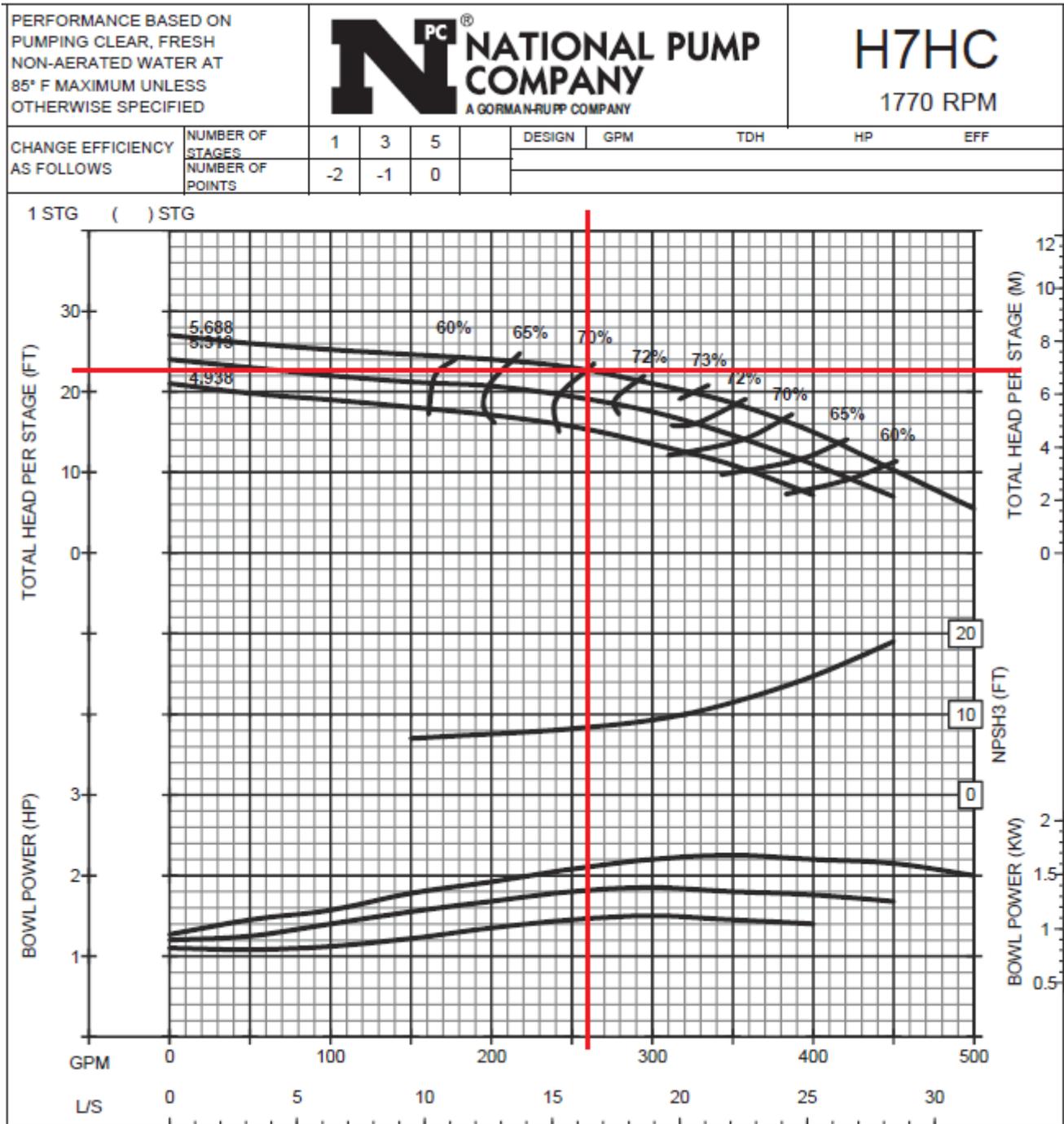
|                   |                       |
|-------------------|-----------------------|
| <b>Marca</b>      | National Pump Company |
| <b>Modelo</b>     | H7HC                  |
| <b>Velocidad</b>  | 1770 RPM              |
| <b>Q</b>          | 260 GPM               |
| <b>H</b>          | 22 pies               |
| <b>Etapas</b>     | 2                     |
| <b>Eficiencia</b> | 70%                   |

$$BHP = \frac{Etapas \times H \times Q \times S_r G_r}{3960 \times Eff} (7)$$

$$HP_{Entrada} = \frac{BHP}{\eta} (8)$$

$$kW_{Entrada} = HP_{Entrada} \times 0.746 (9)$$

## CURVA DEL SISTEMA



### 3. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

#### 3.1 VÁLVULA DE CONTROL

Basados en los datos del comportamiento de las variables controladas al modificar el grado de apertura de la válvula de control de la línea, se hará una evaluación del punto de operación y del perfil de consumo energético de la bomba del sistema con la acción de la válvula de control en un sistema de pruebas.

Para el desarrollo de la prueba, se ha empleado un motor de 5 HP. Con los resultados de la evaluación se han representado los perfiles de desempeño del sistema al controlar el flujo (agua) con válvula proporcional. Los resultados anotarlos en la tabla 1.

| Pot. Succión | Pot. descarga | Válvula % | Carga (m) | I (A) | Caudal (GPM) | Pot. eléctrica |
|--------------|---------------|-----------|-----------|-------|--------------|----------------|
|              |               |           |           |       |              |                |
|              |               |           |           |       |              |                |
|              |               |           |           |       |              |                |
|              |               |           |           |       |              |                |
|              |               |           |           |       |              |                |
|              |               |           |           |       |              |                |
|              |               |           |           |       |              |                |
|              |               |           |           |       |              |                |

Tabla 1. Desempeño con la válvula de control.

- 1- Graficar una curva H (carga) versus Q (caudal).
- 2- Graficar una curva eficiencia versus Q e indicar de acuerdo a la gráfica del sistema el punto en que se está trabajando y comparar.
- 3- Concluir en base a las curvas obtenidas y la curva del sistema.

#### 3.2 VARIADOR DE FRECUENCIA

Basados en los datos del comportamiento de las variables al ejercer acciones de control sobre la bomba con el variador de frecuencia, se realizará una evaluación del punto de operación del perfil y del consumo energético de la bomba del sistema.

Con los resultados de la evaluación, se presentarán los perfiles de desempeño del sistema al controlar la velocidad de giro del motor de inducción de la bomba con variador de frecuencia eléctrica. Así, se regula el comportamiento hidráulico en la tubería, al regular la energía sobre el elemento de impulsión de la bomba. Los resultados relevantes de la muestra se escribirán en la Tabla 2.

| Pot. Succión | Pot. descarga | Velocidad % | Carga (m) | I (A) | Caudal (GPM) | Pot. eléctrica |
|--------------|---------------|-------------|-----------|-------|--------------|----------------|
|              |               |             |           |       |              |                |
|              |               |             |           |       |              |                |
|              |               |             |           |       |              |                |
|              |               |             |           |       |              |                |
|              |               |             |           |       |              |                |
|              |               |             |           |       |              |                |
|              |               |             |           |       |              |                |
|              |               |             |           |       |              |                |

Tabla 1. Desempeño con la válvula de control.

- 1- Graficar una curva H (carga) versus Q (caudal).
- 2- Graficar una curva eficiencia versus Q e indicar de acuerdo a la gráfica del sistema el punto en que se está trabajando y comparar.
- 3- Concluir en base a las curvas obtenidas y la curva del sistema.

### 3.3 COSTO DE BOMBEO A PRESIÓN O CAUDAL CONSTANTE

Una medida para calcular el costo del bombeo es la energía específica ( $E_s$ ), la cual se mide en kWh/m<sup>3</sup>. La energía específica es una medida útil para comparar soluciones de control para diferentes sistemas. En sistemas de flujo constante este cálculo es simple, empleando la ecuación pertinente. En sistemas con variación de flujo se hace un poco más complejo, porque cada punto de operación se calcula por separado y se suma para obtener el costo total.

$$E_s = \frac{\text{Energía utilizada}}{\text{Volumen bombeado}} \quad (10)$$

De acuerdo con lo dicho anteriormente los índices de energía específica, sugieren la energía requerida para transportar un fluido desde el punto en el que se ubica la reserva hasta el punto final de la línea en donde se recibe el producto. En otras palabras, la energía específica va asociada con el costo que se debe asumir para bombear un volumen de producto.

Completar las tablas 3 y 4, se consigna la energía específica necesaria para efectuar el transporte del hidrocarburo a través del circuito de pruebas, para los casos estudiados en el numeral 3. Al observar la energía específica empleada punto a punto en la tabla 3, se tiene que al disminuir el flujo la energía específica aumenta y, por tanto se elevan los costos para transportar un mismo volumen de producto por el resultado de la acción de control presente. En el caso de la tabla 4, la energía específica disminuye punto a punto bajando el costo de transporte del producto por la misma línea y a las mismas tasas de flujo que en la tabla 3.

| Pot. Desc. (PSI) | Válvula (%) | Carga (m) | Caudal (GPM) | Caudal (m <sup>3</sup> /h) | Pot. Eléctrica (W) | Es (kWh/m <sup>3</sup> ) |
|------------------|-------------|-----------|--------------|----------------------------|--------------------|--------------------------|
|                  |             |           |              |                            |                    |                          |
|                  |             |           |              |                            |                    |                          |
|                  |             |           |              |                            |                    |                          |
|                  |             |           |              |                            |                    |                          |
|                  |             |           |              |                            |                    |                          |
|                  |             |           |              |                            |                    |                          |
|                  |             |           |              |                            |                    |                          |
|                  |             |           |              |                            |                    |                          |

Tabla 3. Índice de energía específica para control con válvula

| Pot. Desc. (PSI) | Velocidad (%) | Carga (m) | Caudal (GPM) | Caudal (m <sup>3</sup> /h) | Pot. Eléctrica (W) | Es (kWh/m <sup>3</sup> ) |
|------------------|---------------|-----------|--------------|----------------------------|--------------------|--------------------------|
|                  |               |           |              |                            |                    |                          |
|                  |               |           |              |                            |                    |                          |
|                  |               |           |              |                            |                    |                          |
|                  |               |           |              |                            |                    |                          |
|                  |               |           |              |                            |                    |                          |
|                  |               |           |              |                            |                    |                          |
|                  |               |           |              |                            |                    |                          |
|                  |               |           |              |                            |                    |                          |

Tabla 4. Índice de energía específica para control con VFD

- Hacer las observaciones y conclusiones pertinentes en base a los datos de energía específica calculados. ¿Económicamente, cómo conviene controlar un sistema de bombeo?

#### 4. ASIGNACIONES

1- En base al punto de operación en que se está trabajando, usar las ecuaciones (7), (8) y (9) para calcular: Potencia al freno, potencia en el eje y potencia eléctrica.

2- Investigar en las normas NEMA cuales son las características que debe tener un motor inverter Duty para ser usado con un variador de frecuencia.

3- Comparar las curvas H versus Q para ambos casos experimentados y explicar el porqué de su similitud o diferencia vistas

4- Explicar las ecuaciones de afinidad (6) y ejemplificar su uso con algunos datos obtenidos en las pruebas hechas en esta práctica de laboratorio.

5- Checar la red híbrida y explicar el papel que desempeñan los inversores en este sistema de bombeo.