

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE  
INGENIERÍA, PUEI

**Análisis de eficiencia de un sistema de bombeo para riego de  
cultivos en una población rural**

**T E S I N A**

PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**ESPECIALISTA EN AHORRO Y USO EFICIENTE DE LA  
ENERGÍA**

**PRESENTA:**

Ing. Héctor Edoardo Morales Aguilar

**DIRECTORA DE TESINA**

M.I. Verónica Flores García



Ciudad Universitaria, CD. MX. 2021



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

# Índice general

<b>Introducción</b>	<b>v</b>
<b>1 Marco contextual</b>	<b>1</b>
1.1 Situación actual	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Justificación	3
1.4 Alcance	4
<b>2 Introducción a la eficiencia energética en los sistemas de riego</b>	<b>5</b>
2.1 Riego	5
2.1.1 Cálculo de requerimiento de riego	5
2.2 Elementos físicos de un sistema de riego	7
2.3 Caracterización energética del sistema de bombeo	7
2.3.1 Análisis de Energía para flujos estacionarios	8
<b>3 Normatividad aplicable a los sistemas de riego</b>	<b>9</b>
3.1 Normas Oficiales Mexicanas	9
3.1.1 NOM-001-SEDE-2012	9
3.1.2 NOM-006-ENER-2015	9
3.1.3 NOM-010-ENER-2004	10
3.2 Normas Mexicanas	10
3.2.1 NMX-AA-179-SCFI-2018	10
<b>4 Plan de medición y obtención de información</b>	<b>11</b>
4.1 Plan de medición	11
4.2 Elección de formatos de levantamiento	12
4.3 Levantamiento de datos en campo	13
4.4 Datos obtenidos	16
4.4.1 Plano de red de distribución	16
4.4.2 Datos de tubería	18
4.4.3 Datos de la bomba	19
4.4.4 Curvas de elevación	21
4.4.5 Diagrama Unifilar del pozo	22
4.4.6 Facturación eléctrica	23
4.5 Mediciones eléctricas	24
<b>5 Procesamiento de datos</b>	<b>25</b>
5.1 Determinación de volumen de riego	25
5.1.1 Estimación de área de riego	25
5.1.2 Requerimiento hídrico por plantación	27
5.2 Cálculo de carga hidráulica	29
5.2.1 Pérdidas por carga de elevación	29
5.2.2 Pérdidas mecánicas (accesorios y fricción)	29
5.2.3 Desempeño de la bomba actual	32
5.3 Evaluación del consumo eléctrico actual	33
5.3.1 Evaluación con base en la tarifa	33
5.3.2 Corrección de factor de potencia	35
<b>6 Presentación de propuestas de Ahorro y Uso eficiente de la Energía</b>	<b>37</b>
6.1 Propuestas técnicas	37

6.1.1	Instalación de un variador de frecuencia para la bomba . . . . .	37
6.2	Propuestas operacionales . . . . .	42
6.2.1	Aprovechamiento de beneficios por tarifa eléctrica . . . . .	42
6.3	Viabilidad económica de las propuestas . . . . .	43
6.3.1	Instalación de un variador de frecuencia para la bomba . . . . .	43
6.3.2	Bonificación por corrección de factor de potencia . . . . .	44
6.3.3	Aprovechamiento de tarifa nocturna . . . . .	45
<b>7</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>46</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>48</b>
<b>A</b>	<b>Métodos de Riego</b>	<b>48</b>
A.1	Riego por superficie . . . . .	48
A.2	Riego por aspersión . . . . .	49
A.3	Riego localizado . . . . .	51
A.3.1	Goteros . . . . .	51
A.3.2	Microaspersores y Difusores . . . . .	52
A.3.3	Tuberías emisoras . . . . .	53
A.4	Comparativa de tipos de riego . . . . .	53
<b>B</b>	<b>Accesorios</b>	<b>54</b>
<b>C</b>	<b>Formatos</b>	<b>55</b>
C.1	Formato de levantamiento de medición de bomba . . . . .	55
<b>D</b>	<b>Documentos complementarios</b>	<b>58</b>
D.1	Plano de red de tuberías . . . . .	58
D.2	Plano de red de tuberías con curvas de nivel . . . . .	60
	Referencias . . . . .	62

# Índice de figuras

Fig.1.1	Sistema de riego de la comunidad de Huitziltepec, Puebla(Vista Satelital)	2
Fig.1.2	Distribución de cultivos	2
Fig.1.3	Consumo del sistema durante el año 2019	3
Fig.2.1	Estados de humedad en el suelo	6
Fig.4.1	Formato de (a)levantamiento de información y (b) mediciones	12
Fig.4.2	Oficina Soc. Sotolcoyotl	13
Fig.4.3	Tren de descarga	13
Fig.4.4	Banco de capacitores instalado actualmente	14
Fig.4.5	Medidores instalados	14
Fig.4.6	Mediciones para estudio	14
Fig.4.7	Pozo e hidrante en operación	15
Fig.4.8	Plano con Longitudes de tubería	16
Fig.4.9	Reporte de instalación de la bomba	19
Fig.4.10	Curva de desempeño de la bomba	20
Fig.4.11	Plano de tubería con curvas de nivel	21
Fig.4.12	Diagrama Unifilar del sistema de bombeo	22
Fig.5.1	Polígonos de áreas de riego	25
Fig.5.2	Suelos dominantes de Huitziltepec, Puebla	27
Fig.5.3	Procedimiento para el cálculo de pérdidas mecánicas	29
Fig.5.4	Curva de operación de la bomba actual	32
Fig.5.5	Curva de eficiencia de la bomba actual	33
Fig.5.6	Curvas representativas de los sistemas	34
Fig.5.7	Consumos energéticos con sus respectivos costos	35
Fig.6.1	Curvas representativas de los sistemas	38
Fig.6.2	Curvas representativas de los sistemas	39
Fig.6.3	Grafica comparativa de consumo	41
Fig.6.4	Gráficas de consumo entre sistema actual y la nueva propuesta	42
Fig.6.5	Gráficas de tiempo de uso del sistema de bombeo	43
Fig.A.1	Etapas riego por superficie	49
Fig.A.2	Esquema general de un sistema de riego por aspersión	50
Fig.A.3	Sistema de riego con Pivotes	50
Fig.A.4	Sistema de riego con Cañón	51
Fig.A.5	Esquema general de un sistema de riego localizado	52
Fig.A.6	Ejemplos de goteros Interlinea y Pinchados	52
Fig.A.7	Ejemplos microaspersor (tipo bailarina)	52

# Indice de tablas

2.1	Profundidad radicular efectiva de los cultivos más comunes . . . . .	6
2.2	Propiedades físicas de los suelos . . . . .	7
4.1	Coordenadas Geográficas de Hidrantes . . . . .	17
4.2	Datos de red de distribución . . . . .	18
4.3	Alturas de salida de cada hidrante . . . . .	21
4.4	Facturación eléctrica del sistema de bombeo . . . . .	23
4.5	Datos generados por el analizador de redes . . . . .	24
5.1	Áreas de las parcelas de riego . . . . .	26
5.2	Lámina de agua calculada requerida por cultivo en los distintos tipos de suelo . . . . .	28
5.3	Determinación de volumen de agua requerido por sitio . . . . .	28
5.4	Perdidas mecánicas debidas a accesorios . . . . .	31
5.5	Pérdidas mecánicas debidas a la fricción a lo largo de la tubería . . . . .	31
5.6	Carga total de la bomba para cada uno de los hidrantes . . . . .	32
6.1	Nuevas condiciones de operación . . . . .	39
6.2	Características de puntos de operación bajo nuevas condiciones . . . . .	40
6.3	Comparativa de consumos actuales y propuestos . . . . .	40
6.4	Beneficios mensuales obtenidos por ajuste al horario de riego . . . . .	45
A.1	Comparativa entre sistemas de riego . . . . .	53
B.1	Coficiente de pérdida menores para codos y accesorios. . . . .	54

# INTRODUCCIÓN

El presente documento representa el resumen del trabajo realizado para obtener el grado de especialista en Ahorro y Uso Eficiente de la Energía, el cual está enfocado en realizar un análisis sobre el estado, la operación y oportunidades de mejora para el uso eficiente de la energía en un sistema de bombeo empleado para labores de riego agrícola.

En el Capítulo 1 se describe el estado actual y las condiciones sistemáticas y de operación a las que se enfrentan los usuarios del sistema de riego, cuáles son las motivaciones que se tienen para llevar a cabo este proyecto y los objetivos que se busca lograr con el desarrollo de este trabajo.

En el Capítulo 2, se hace una descripción de los elementos y la teoría que fue necesaria comprender para poder desarrollar este proyecto. Esto abarca temáticas sobre requerimiento de agua para las plantaciones, los elementos que comprenden el sistema de riego y los modelos matemáticos que representan el comportamiento energético del sistema estudiado.

En el Capítulo 3 se hace mención de la Normativa existente que sirvió de sustento para la obtención de datos y evaluación del desempeño del sistema de riego, mientras que en el Capítulo 4 se presenta la estrategia empleada para recabar la información necesaria para desarrollar la evaluación y operación del sistema.

El Capítulo 5 presenta el análisis de los datos obtenidos en el Capítulo 4, con lo que se sustentan y desarrollan las propuestas que pudieran mejorar el desempeño de la operación del sistema de riego, y ya en el Capítulo 6 se encuentra la descripción de las propuestas que beneficiaran a los usuarios del sistema, así como su respectivo análisis de viabilidad económica.

Por último, el Capítulo 6 muestra las conclusiones del trabajo realizado.

Adicionalmente, se incorpora una sección de Anexos los cuales aportan información respecto a temas que ayudan al entendimiento de este trabajo, los cuales son:

- Una breve descripción referente a los diversos métodos de riego que pueden emplearse con el fin de optimizar los recursos.
- Una tabla que presenta los coeficientes de diversos accesorios y cuyos valores fueron empleados para la determinación de la carga hidráulica a la que se somete la bomba.
- Una plantilla del formato empleado para el levantamiento de la información de desempeño de la bomba.
- El conjunto de planos desarrollados para la elaboración de este trabajo.

## MARCO CONTEXTUAL

Uno de los principales problemas a los que se enfrentan los agricultores, es la limitación de la disponibilidad de agua para el sustento de sus cultivos. Históricamente, la producción agrícola dependía completamente del riego de temporal, lo cual ocasionaba que no siempre se pudiera cumplir con el objetivo de producir las hortalizas necesarias para el sustento de las comunidades tanto para su subsistencia como para el comercio. De esta condición surge la necesidad de idear sistemas para tratar de ayudar a aminorar la dependencia de la agricultura de temporal, los cuales consisten en proveer de agua a los cultivos, ya sea por la extracción de mantos acuíferos del subsuelo o de algún cuerpo de agua superficial y se conocen como sistemas de riego.

Derivado de la idea de implementar dichos sistemas, se presenta la necesidad de tener un nuevo elemento para el desarrollo de proyectos agrícolas, el cual es una fuente energética para poder llevar a cabo el traslado del recurso hidráulico desde la captación hasta las unidades de riego. Considerando que en la actualidad el sector agrícola es uno de los sectores más limitados en recursos económicos y que se estima que los costos de riego oscilan entre un 15 % y 55 % de los agrocostos (AGRICULTURA, 2020), que no existe una adecuada infraestructura que permita la correcta distribución de energía eléctrica para estas comunidades y el desconocimiento de las mejores prácticas para un correcto uso de los sistemas de riego, conlleva a la necesidad de desarrollar soluciones que puedan ejecutar de manera eficiente la tarea de irrigación en los sembradíos.

### 1.1 SITUACIÓN ACTUAL

En el municipio de Santa Clara Huitziltepec en el Estado de Puebla, se cuenta con un pozo que sirve para suministrar agua para el riego de los cultivos de toda la comunidad y poblaciones aledañas. Durante el tiempo de existencia de este pozo, se han realizado dos cambios de bomba sin que los pobladores sepan el porqué de dichos cambios.

En la actualidad los usuarios del sistema de bombeo no tienen una metodología para determinar el requerimiento volumétrico de gasto para cada uno de sus cultivos, ya que en su mayoría se emplean técnicas de riego por superficie independientemente del tipo de cultivo que se tenga.

En la Fig. 1.1 se muestra una vista satelital de los elementos que componen el sistema de riego:

- Bomba
- Hidrantes
- Tuberías y accesorios
- Parcelas de riego



Fig. 1.1 Sistema de riego de la comunidad de Huitziltepec, Puebla(Vista Satelital)

Durante el proceso de evaluación, se realizó una consulta para determinar cual era el cultivo que se tenía sembrado (septiembre 2019), de las 40 parcelas para las que se disponen los hidrantes, se tienen 38 sembradas y dos en reposo, en la Fig. 1.2 se muestra la distribución de los cultivos.

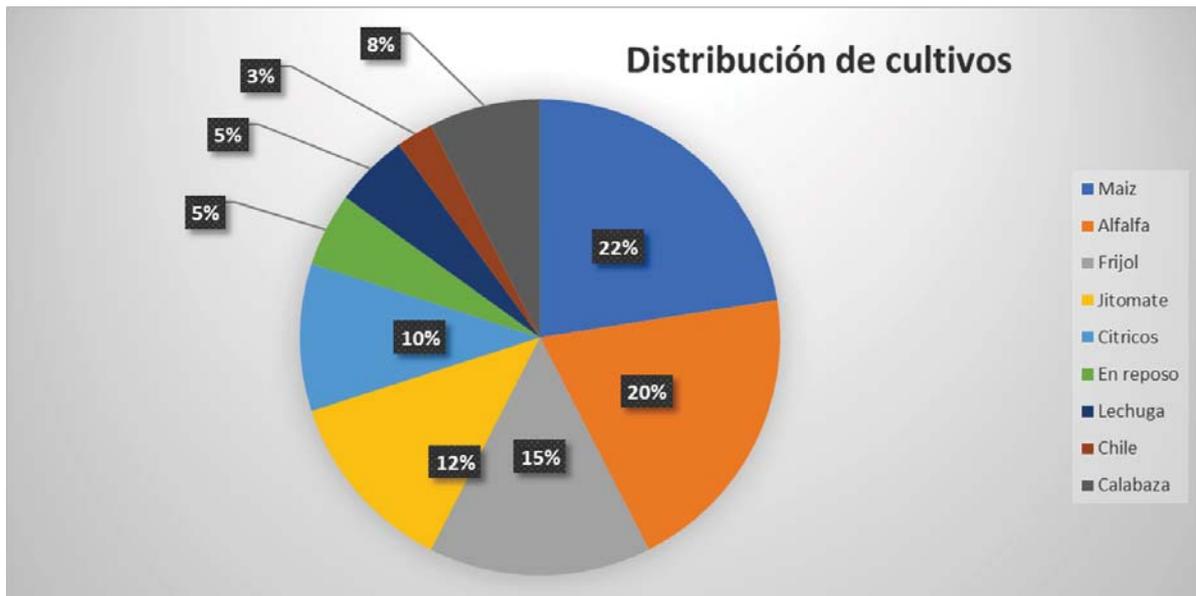


Fig. 1.2 Distribución de cultivos

Del sistema de riego se logró obtener la facturación del año 2019, la cual se muestra a manera de gráfica en la Fig. 1.3. Para años anteriores no se pudo generar la traza de datos completas debido a que no se cuentan con recibos de 6 meses del año 2018, de la información provista de la facturación también se puede observar que existen cargos por bajo factor de potencia a pesar de que se cuenta con un banco de capacitores.

Desde el punto de vista energético se desconocen los consumos que tiene el sistema, y desde el punto de vista de operación, si se lleva a cabo de manera óptima.

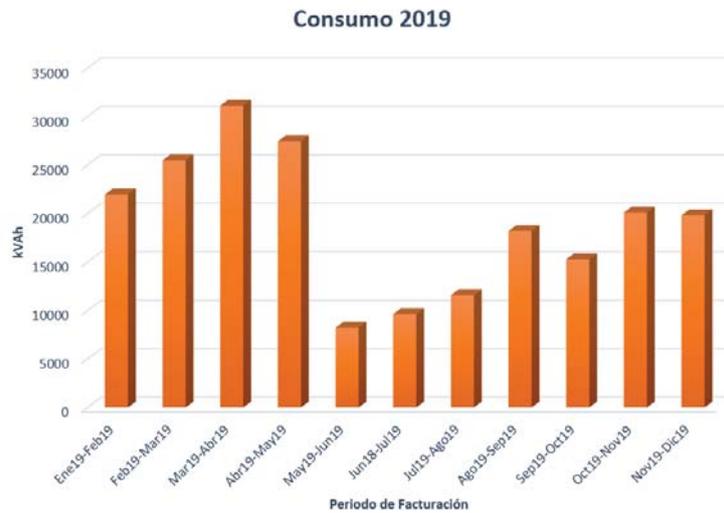


Fig. 1.3 Consumo del sistema durante el año 2019

## 1.2 OBJETIVOS

### OBJETIVOS GENERALES

- Evaluar el estado actual del sistema de riego, la eficiencia operativa, la eficiencia energética y sus costos de operación.
- Identificar oportunidades de mejora de ahorro y usos eficiente de la energía.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar los componentes técnicos y operativos del sistema de riego.
- Identificar los factores que influyen en el consumo energético.
- Proponer mejoras prácticas operativas para el sistema de riego.
- Evaluar si la técnica de riego es congruente con la operación eficiente del sistema de riego.

## 1.3 JUSTIFICACIÓN

El componente principal en un sistema de riego tecnificado, es el sistema de bombeo, el cual genera el mayor impacto económico dentro de los insumos para la producción agrícola principalmente en temporada de estiaje.

El sistema de riego y el equipo de bombeo presenta gran variabilidad en cuanto a las condiciones operativas, adicionalmente se conoce que la técnica de riego no siempre se apega a los parámetros que se sugieren en la misma, además de que los productores no cuentan con asesoría técnica para un adecuado manejo de sus cultivos.

El análisis del sistema de bombeo, pretende generar información relevante que sustente de manera técnica el estado actual del sistema y en caso de que no cumpliera con los requisitos de operación necesarios, plantear una solución óptima que cumpla con las necesidades que se tengan.

## 1.4

### **ALCANCE**

---

El presente trabajo considera los siguientes alcances:

- Que la población de la comunidad beneficiada por el sistema de riego conozca el rendimiento energético de dicho sistema.
- Proponer mejoras operativas a las técnicas de riego empleadas actualmente por la comunidad de tal forma que se manejen de manera óptima los recursos energéticos e hídricos.
- Generar un plano del sistema de riego actual.

## CAPÍTULO 2

# INTRODUCCIÓN A LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LOS SISTEMAS DE RIEGO

En este capítulo, se abordarán de forma breve algunos conceptos clave que servirán de apoyo para el entendimiento del presente trabajo.

## 2.1 RIEGO

El riego se puede definir como el aporte artificial de agua a las plantas con el fin de suministrar la humedad necesaria para su desarrollo y/o para aumentar su producción, de forma complementaria a las precipitaciones. Además de cumplir con su función de proveer la humedad necesaria a las plantas, el riego tiene los siguientes objetivos:

- El **transporte** de nutrientes desde el suelo a la planta.
- La **lixiviación** del exceso de sales del suelo, que a determinadas concentraciones puede ser perjudicial para las plantas.
- Un **efecto térmico** microclimático favorable. La humedad en la zona próxima a la planta se comporta como un termostato, reduciendo el riesgo de heladas en épocas frías y suavizando el calor en el verano.(Cortijo, 2014)

Algunos autores indican que si bien la agricultura moderna reclama una alta tecnificación en el aprovisionamiento de riego lo anterior no significa que se alcance altas eficiencia si los sistemas no operan adecuadamente bajo las premisas de diseño. Entre los aspectos que destacan estos autores son que *”La implementación de la tecnología de riego requiere de tres etapas: i) diseño, ii) instalación y iii) manejo, cada una de estas etapas debe ser implementada correctamente, si una resulta deficiente, el sistema de riego, como elemento de un sistema de producción agrícola, será deficiente sin importar el grado de perfección con que se hayan realizado las otras dos etapas. Por lo tanto, la evaluación de sistemas de riego debe ser un procedimiento rutinario con la finalidad de detectar fallas de manera oportuna para su solución”.* (Tun Dzul, Ramírez Jaramillo, Cano González, y Sanchez Cohen, 2016)

### 2.1.1

#### CÁLCULO DE REQUERIMIENTO DE RIEGO

Uno de los aspectos más importantes, es la forma en que se distribuirá el agua en los sembradíos, por lo que se hace una breve semblanza de las consideraciones a tomar en cuenta para determinar la cantidad de agua requerida por cultivo.

En la Fig. 2.1 se muestran los estados de humedad del suelo, cuya descripción se presenta a continuación:

- **Saturación:** esta condición se presenta cuando el nivel de humedad en el suelo es el máximo dado que los poros se llenan al máximo. La mayoría de los cultivos no pueden sobrevivir más de cinco días en estas condiciones, siendo el arroz la excepción a esta regla.
- **Capacidad de Campo (CC):** es el máximo nivel de agua que el suelo puede retener, es decir, el nivel de humedad del suelo una vez que el proceso de drenaje ha terminado. En este estado de humedad los poros grandes contienen tanto aire como agua, mientras que los más pequeños están aún repletos de agua. Se expresa en porcentaje de volumen de agua.
- **Punto de Marchitez Permanente (PMP):** cuando el suelo no recibe nuevos aportes de agua, la evaporación desde el suelo y la extracción por parte de las raíces hacen que el agua decremente poco a poco. Cuanto más se seca el suelo, más firmemente es retenida el agua por el suelo, y más difícil resulta para las plantas extraer el agua. Llega un momento en que la extracción del agua por parte de las plantas no es suficiente para cubrir sus necesidades y empiezan a marchitarse y finalmente se mueren.(Alocén, 2007)

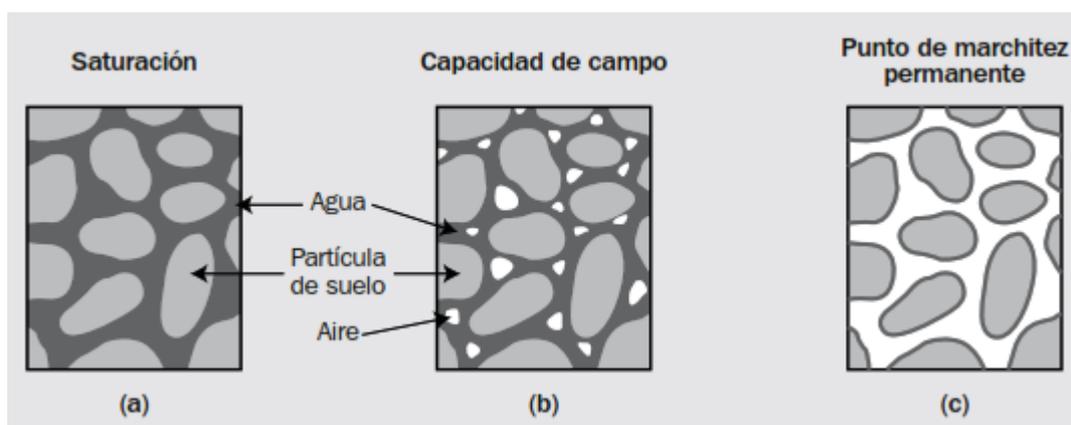


Fig. 2.1 Estados de humedad en el suelo  
(Alocén, 2007)

Los conceptos anteriores son útiles para poder determinar el **agua utilizable por los cultivos (AU)** o **intervalo de humedad disponible (IHD)**, la cual se calcula como la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente:

$$AU = CC - PMP \quad (2.1)$$

Dado que la CC y el PMP dependen de las características del suelo, también dependerá de la textura del suelo la cantidad agua utilizable. Cabe mencionar que, para de esta manera expresar el contenido de agua del suelo, se toma como base 1 m de profundidad de éste. Para este caso la profundidad que se toma en cuenta es la **profundidad radicular efectiva** ( $p_r$ ) del cultivo considerado.(En la Tabla 2.1 se enlistan algunos valores de profundidades radiculares efectivas de arboles y hortalizas comunes). Por lo que la expresión anterior queda de la forma:

$$AU = (CC - PMP)p_r[m] \quad (2.2)$$

Tabla 2.1 Profundidad radicular efectiva de los cultivos más comunes

(Alocén, 2007)

Cultivo	Profundidad efectiva (cm)	Cultivo	Profundidad efectiva (cm)
Banana	50-90	Pepino	70-120
Melón	100-150	Frijol	50-90
Cítricos	120-150	Maíz	75-160
Olivo	100-150	Alfalfa	90-180
Chile	50-100	Papa	40-60
Fresa	20-30	Otras hortalizas	20-30
Cebolla	30-75	Otras leguminosas	50-125

Por lo general, los datos de CC y de PMP se expresan como  $\theta_g$  y la AU en altura de lámina de agua [mm]. Así la expresión general queda de la forma:

$$AU[mm] = 10(CC[\% \theta_g] - PMP[\% \theta_g])d_a\left[\frac{g}{cm^3}\right]p_r[m] \quad (2.3)$$

En teoría, las plantas podrían extraer agua del suelo hasta el PMP, de modo que se podría regar hasta que el contenido de agua llegará a este nivel y con el nuevo riego se podría llegar hasta CC. Sin embargo, existe un nivel de humedad a partir del cual las raíces tienen muchas complicaciones para extraer el agua del suelo. A este nivel se le denomina **déficit permisible de manejo (DPM)** y se representa como una fracción de AU disponible.

**Tabla 2.2** Propiedades físicas de los suelos

(Alocén, 2007)

Textura del suelo	Densidad aparente ( $\frac{g}{cm^3}$ )	Capacidad de campo ( $\% \theta_g$ )	Punto de marchitez ( $\% \theta_g$ )	Infiltración básica ( $\frac{mm}{h}$ )
<b>Arenoso</b>	1.65 (1.55-1.90)	9 (6-12)	4 (2-6)	50 (25-250)
<b>Franco Arenoso</b>	1.50 (1.40-1.60)	14 (10-18)	6 (4-8)	25 (13-75)
<b>Franco</b>	1.40 (1.35-1.50)	22 (18-26)	10 (8-12)	13 (8-20)
<b>Franco Arcilloso</b>	1.35 (1.30-1.40)	27 (23-31)	13 (11-15)	8 (2.5-15)
<b>Arcilloso</b>	1.25 (1.20-1.30)	35 (31-39)	17 (15-19)	5 (1.3-10)

## 2.2

### ELEMENTOS FÍSICOS DE UN SISTEMA DE RIEGO

Dentro de las diferentes configuraciones que pueden existir en los sistemas de riego, a continuación se realiza una descripción general de los elementos que son comúnmente instalados: (Novagric, 2016)

**Captación** : La función es tener una fuente constante de agua para las funciones de irrigación, ésta se puede obtener mediante embalses, pozos o fuentes naturales. Es sumamente importante que esta fuente de captación cuente con una amplia capacidad de regeneración hidráulica.

**Cabezal de riego** : Es la parte central del sistema de riego, y se compone de los elementos que tienen como función el agregar energía al líquido con fin de realizar el traslado de la captación a donde sea requerida. Se compone de:

- Equipo de bombeo
- Equipo de filtrado
- Equipo de inyección de fertilizantes
- Elementos de control

**Red de riego** : Son las tuberías y accesorios a través de los cuales se transporta y distribuye el agua para llegar a los sitios a regar.

**Emisores de riego** : Son los encargados de realizar el suministro de agua a las plantas y/o sembradíos, pueden ser hidrantes, goteros, aspersores, etc... En el Anexo A se puede encontrar una definición más amplia de estos elementos y sus características.

## 2.3

### CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE BOMBEO

Para la realización de análisis de procesos que involucran energía, es necesario plantear una ecuación de balance de materia y energía, esto se deriva del cumplimiento de la **Primera Ley de la Termodinámica (PLT)**, la cual menciona que: "la energía no se puede crear ni destruir en el transcurso de un proceso, solo puede cambiar de formas" (Yunus A. Cengel, 2018).

Las formas en las que se puede transferir la energía, son dos:  $Q$  (transferencia de calor) y  $W$  (transferencia de trabajo), tomando estos factores en cuenta y uniéndolos al enunciado de la PLT, se presenta la siguiente ecuación para un proceso con materia constante:

$$\dot{Q}_{neto} + \dot{W}_{neto} = \frac{dE_{sist}}{dt} \quad (2.4)$$

donde:

- $\dot{Q}_{neto} = \dot{Q}_{ent} - \dot{Q}_{sal}$ , es la variación de calor que entra al sistema (si es negativo, proviene del sistema)
- $\dot{W}_{neto} = \dot{W}_{ent} - \dot{W}_{sal}$ , es la entrada de potencia hacia el sistema (si es negativo, si sale del sistema)
- $\frac{dE_{sist}}{dt}$  es la variación de la energía total del sistema con respecto al tiempo.

### 2.3.1

## ANÁLISIS DE ENERGÍA PARA FLUJOS ESTACIONARIOS

Si se toma en cuenta la Ec. 2.4 para un flujo estacionario<sup>1</sup>, se puede presentar de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_{neto} + \dot{W}_{neto} = \sum_{sal} \dot{m} \left( h + \frac{V^2}{2} + gz \right) - \sum_{ent} \dot{m} \left( h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \quad (2.5)$$

Teniendo en cuenta que la mayoría de los problemas (y en el caso del presente trabajo) los sistemas solo incluyen una sola entrada y una salida, la Ec. 2.5 puede reorganizarse de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_{neto} + \dot{W}_{neto} = \dot{m} \left( h_2 - h_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right) \quad (2.6)$$

En caso de querer realizar el análisis por unidad de masa, se genera la siguiente ecuación y además teniendo en cuenta la definición de la entalpía ( $h=u+pv$ ), se tiene lo siguiente:

$$w_{neto} + \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 + (u_2 - u_1 - q_{neto}) \quad (2.7)$$

La variación en  $\Delta u$  mayor a  $q_{neto}$  se debe a las irreversibilidades de energía mecánica en energía térmica y en que  $\Delta u - q_{neto}$  representa las pérdidas de energía mecánica por unidad de masa, es decir:

$$\text{Flujo con pérdidas de energía mecánica } e_{mec.perdida} = u_2 - u_1 - q_{neto} \quad (2.8)$$

Si se considera que el trabajo neto de entrada en el sistema, es el realizado por la bomba y tomamos en cuenta la Ec. 2.7 se puede describir de la siguiente manera: (Yunus A. Cengel, 2018)

$$w_{bomba} + \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 + e_{mec.perdida} \quad (2.9)$$

Las pérdidas mecánicas del sistema mostradas en la ecuación 2.9 se pueden representar de la siguiente forma:

$$e_{mec.perdida} = \sum k_m \frac{v_2^2}{2g} + h_f \quad (2.10)$$

En donde:

- El primer término hace referencia a las pérdidas menores (originadas por los accesorios de la tubería).
- El segundo término hace referencia a las pérdidas por fricción a lo largo de la tubería.

<sup>1</sup>Se considera que un flujo es estacionario si todas sus variables (velocidad, presión, densidad, temperatura, etc.) son constantes en el tiempo. Es importante mencionar que los flujos no son precisamente estacionarios, sin embargo la variación de los parámetros es tan lenta, que se considera que es un proceso *cuasiestacionario*. (Yunus A. Cengel, 2018)

## CAPÍTULO 3

# NORMATIVIDAD APLICABLE A LOS SISTEMAS DE RIEGO

Para la realización de estudios de eficiencia energética y en general para los proyectos de ingeniería es necesario conocer la normatividad que puede aplicar al proyecto para poder asegurar el cumplimiento de los requerimientos. A continuación se hace la mención de las normas que son aplicables para este proyecto.

### 3.1 **NORMAS OFICIALES MEXICANAS**

*Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) son regulaciones técnicas de observancia obligatoria expedidas por las dependencias competentes, que tienen como finalidad establecer las características que deben reunir los procesos o servicios cuando estos puedan constituir un riesgo para la seguridad de las personas o dañar la salud humana; así como aquellas relativas a terminología y las que se refieran a su cumplimiento y aplicación.*(Normas Oficiales Mexicanas, 2020)

#### 3.1.1

##### **NOM-001-SEDE-2012**

**Título:** Instalaciones eléctricas (utilización)

**Objetivo:** Establecer las especificaciones y lineamientos de carácter técnico que deben satisfacer las instalaciones destinadas a la utilización de la energía eléctrica, a fin de que ofrezcan condiciones adecuadas de seguridad a las personas y sus propiedades. (SENER, 2019)

**Utilidad:** En el presente proyecto se utilizó la norma para verificar que la instalación eléctrica se realizó de una manera conveniente.

#### 3.1.2

##### **NOM-006-ENER-2015**

**Título:** Eficiencia Energética Electromecánica en Sistemas de Bombeo para Pozo Profundo en Operaciones. Límites y Método de Pruebas.

**Objetivo:** Establecer los valores mínimos de eficiencia energética que deben cumplir los sistemas de bombeo para pozo profundo en operación instalados en campo, y especifica el método de prueba para verificar el cumplimiento de estos valores.(SENER, 2015)

**Utilidad:** En el presente proyecto se utilizó la norma para elaborar los formatos de levantamiento de información en campo, así como las características de los equipos y métodos para llevar a cabo las mediciones.

### 3.1.3

---

#### **NOM-010-ENER-2004**

**Título:** Eficiencia energética del conjunto motor bomba sumergible tipo pozo profundo. Límites y métodos de prueba.

**Objetivo:** Establecer los valores mínimos de eficiencia energética que deben cumplir el conjunto motor-bomba sumergible de tipo pozo profundo y establece el método de prueba para verificar en laboratorio dicha eficiencia. (SENER, 2005)

**Utilidad:** Esta norma sirvió de referencia para la elaboración de este proyecto.

## 3.2

---

### **NORMAS MEXICANAS**

---

Estas normas son realizadas por organismos nacionales de normalización o en su defecto por la Secretaría de Economía. Establecen los requisitos a los que se deben sujetar los proveedores de productos y servicios, con el objetivo de orientar a los consumidores. Su aplicación es voluntaria. (de Economía, s.f.)

### 3.2.1

---

#### **NMX-AA-179-SCFI-2018**

**Título:** Medición de Volúmenes de Aguas Nacionales Usados, Explotados o Aprovechados.

**Objetivo:** Establecer las características y especificaciones para la selección, instalación y operación de los medidores y sistemas de medición para el uso, explotación o aprovechamientos de aguas nacionales; la metodología para medir los citados volúmenes; y el procedimiento para la transmisión de los datos de medición a la Comisión Nacional el Agua. (de Normas, s.f.)

**Utilidad:** Esta norma sirvió para conocer los requisitos establecidos por la CONAGUA para el correcto funcionamiento del tren de descarga empleado por los concesionarios para la explotación de aguas nacionales.

# PLAN DE MEDICIÓN Y OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN

Para el presente caso de estudio, se ha decidido dividir el análisis en dos etapas, dado que se deben de cumplir con dos requerimientos, por un lado es necesario determinar si la bomba que se tiene cumple de manera eficiente la labor de extracción del agua. Adicionalmente, considerando que se tienen distintos puntos finales en los que se debe suministrar el agua, se pretende evaluar si esta tarea se lleva a cabo de manera eficiente. Por lo que en este Capítulo, se muestra un resumen de la estrategia para llevar a cabo la obtención de información del sistema a evaluar.

## 4.1 PLAN DE MEDICIÓN

Para la elaboración del presente plan se tomaron en cuenta las recomendaciones que promueve la CONUEE (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía) para la elaboración de diagnósticos energéticos en equipos de bombeo de agua potable (CONUEE/GIZ, 2014). De acuerdo con la guía, se requiere la medición de los siguientes parámetros:

- Mediciones eléctricas
  - Tensión entre fases
  - Corriente por fase
  - Factor de potencia por fase
  - Potencia activa por fase
- Mediciones hidráulicas
  - Flujo volumétrico
  - Velocidad del fluido

Adicional a las recomendaciones establecidas por la guía mencionada anteriormente, se requiere un levantamiento de la red de distribución actual para poder estimar la carga hidráulica que se requiere vencer, por lo que es necesario la obtención ó realización de un plano para la elaboración de dicha estimación.

En conjunto con lo indicado en (CONUEE/GIZ, 2014) se presenta el siguiente listado de actividades para la recopilación de datos.

### 1. Levantamiento de datos del sistema de bombeo.

Es necesario recabar la medición de las variables mencionadas en el párrafo anterior, por lo que se utilizará el formato presentado en el Anexo. C.1. Véase la sección 4.2 para mayor información sobre la elección del formato.

### 2. Recabar información sobre el historial de facturación eléctrica.

Para llevar a cabo esta tarea se solicitará información sobre el medidor que tienen y los registros que pudieran llegar a tener sobre los recibos eléctricos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

3. Realizar un levantamiento del sistema eléctrico que suministra energía a la bomba.
4. Recabar información sobre los hábitos de operación
5. Identificar los puntos de salida de la red
6. Conocer los requerimientos que se tienen que cumplir en el sistema

## 4.2 ELECCIÓN DE FORMATOS DE LEVANTAMIENTO

A continuación en la Fig. 4.1 se presentan los formatos empleados para el levantamiento de información .

REPORTE PARA LEVANTAMIENTO DE DATOS DE SISTEMA DE BOMBEO					
Propietario:					
Domicilio:					
Localización del pozo:					
PARAMETROS DE LA BOMBA					
Marca:		Modelo:			
Carga total:		No. De pasos:			
Eficiencia:					
DATOS DE COLUMNA					
Diámetro de succión:		Diámetro de la flecha:			
DATOS DE PLACA DE MOTOR					
Marca:		Modelo:			
Eficiencia:		Tensión de operación:			
Potencia:		Frecuencia de rotación:			
Comentarios:					
INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN					
VARIABLE	TIPO	MODELO	CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN		FECHA DE VEN.
FLUJO			EXACTITUD	EXPEDIDO POR	
PRESIÓN					
NIVEL DINAMICO					
POTENCIA ELÉCTRICA (MED. DIRECTA)					
VOLMETRO					
AMPERMETRO					
FACTORIMETRO					
DURACIÓN PRUEBA					
FECHA:		RESPONSABLE:			
HORA DE INICIO:		HORA DE FIN:			

(a) Información de levantamiento

REPORTE PARA LEVANTAMIENTO DE DATOS DE SISTEMA DE BOMBEO						
ITEM	SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	1	2	3	4
1	Di	Diámetro Interno de la tubería				
2	n	Frecuencia de rotación				
3	ND	Nivel Dinámico				
4	x	Distancia desde el nivel de referencia a la línea de centros del manómetro				
5	Pf	Lectura del manómetro a la descarga				
6	Pm	Lectura del manómetro a la descarga				
7	A	Área del tubo a la descarga				
8	qv	Flujo				
9	hv	Carga de velocidad				
10	h <sub>lc</sub>	Pérdidas de fricción en la columna				
11	hd	Carga a la descarga				
12	H	Carga total				
	IA	Corriente Línea A				
	IB	Corriente Línea B				
13	IC	Corriente Línea C				
	I	Promedio				
	VAB	Tensión fase AB				
	VAC	Tensión fase AC				
14	VBC	Tensión fase BC				
	V	Promedio				
	fpA	Factor de potencia A				
	fpB	Factor de potencia B				
15	fpC	Factor de potencia C				
	fp	promedio				
16	Pe	Potencia de entrada al motor				
17	Ps	Potencia de salida de la bomba				
18	h	Eficiencia electromecánica				

(b) Mediciones

Fig. 4.1 Formato de (a)levantamiento de información y (b) mediciones

## 4.3 LEVANTAMIENTO DE DATOS EN CAMPO

Durante el levantamiento de información, se pudo observar que las instalaciones actuales del cuarto de control del sistema de bombeo se encuentran en buenas condiciones, sin embargo cabe mencionar que no se realizan actividades de limpieza por desconocimiento y descuido de los operadores, dentro del cuarto de control se encuentra un interruptor general de alimentación para la bomba, un gabinete con el sistema de arranque para la bomba y su respectivo banco de capacitores (Fig. 4.4) para la corrección del factor de potencia. Por otro lado los equipos de medición montados en el tren de descarga (Fig. 4.3) están descompuestos (manómetro (Fig. 4.5a) y medidor de caudal (4.5b)) se tomaron las siguientes fotografías.



Fig. 4.2 Oficina Soc. Sotolcoyotl



Fig. 4.3 Tren de descarga



Fig. 4.4 Banco de capacitores instalado actualmente



(a) Manómetro



(b) Medidor de flujo

Fig. 4.5 Medidores instalados



(a) Mediciones eléctricas



(b) Medición de flujo

Fig. 4.6 Mediciones para estudio

Con respecto a las condiciones en las que se realizaron las mediciones, se hacen las siguientes menciones:

- Las mediciones eléctricas (Fig. 4.6a) se realizaron durante un periodo aproximado de media hora, dado que no existe variación en la carga que se alimenta, no se considera relevante un periodo de medición mayor.
- Las mediciones de flujo (Fig. 4.6b y Fig. 4.7) se realizaron en el hidrante mas cercano a la obra de toma, dado que la norma NOM-006-ENER-2015 sugiere que se realice a la salida de la descarga del sistema de bombeo. La velocidad obtenida para los cálculos se obtuvo del promedio de mediciones durante 2 minutos.



**Fig. 4.7** Pozo e hidrante en operación

## 4.4 DATOS OBTENIDOS

A continuación, se muestran los datos obtenidos durante la visita al sitio en conjunto con información relevante que sirve de apoyo al análisis.

En cada uno de los puntos mencionados, se hará una breve descripción de la utilidad de los datos mostrados para el desarrollo del proyecto.

### 4.4.1

#### PLANO DE RED DE DISTRIBUCIÓN

La Fig. 4.8 muestra una el plano realizado durante el presente proyecto, este se puede consultar con mayor detalle en los anexos del presente documento. (Ver D.1)

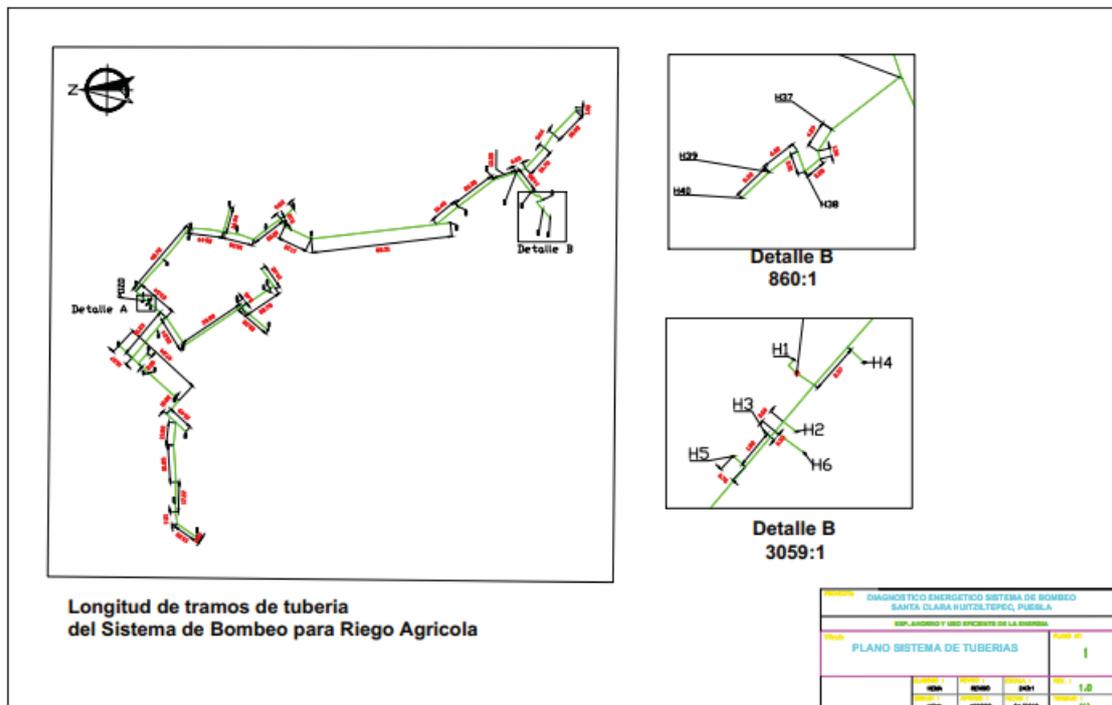


Fig. 4.8 Plano con Longitudes de tubería

Dentro de los primeros acercamientos que se tuvieron con los miembros de la sociedad de riego, se hizo mención de que no se tenía un conocimiento claro del recorrido de la tubería, tanto en longitud como cantidad de accesorios y el estado de cada uno de los elementos. Por lo a petición de la sociedad se solicitó que se pudiera añadir a los alcances de este proyecto un plano del sistema de bombeo actual.

**Tabla 4.1** Coordenadas Geográficas de Hidrantes

Identificador	Latitud	Longitud	Identificador	Latitud	Longitud
H1	18.765816	-97.8783802	H21	18.7433914	-97.8717881
H2	18.765715	-97.8783431	H22	18.7426935	-97.8722074
H3	18.7658142	-97.878529	H23	18.7430495	-97.8723402
H4	18.7661537	-97.8783906	H24	18.7427048	-97.8728204
H5	18.7661415	-97.8780645	H25	18.7422768	-97.8732712
H6	18.7665574	-97.8774136	H26	18.7592007	-97.876437
H7	18.7649245	-97.8759936	H27	18.7586781	-97.8776078
H8	18.7634057	-97.8741356	H28	18.7586911	-97.8778051
H9	18.7633617	-97.8740209	H29	18.7605853	-97.8784399
H10	18.7610675	-97.8728405	H30	18.7587984	-97.8800536
H11	18.7606652	-97.8742075	H31	18.7637238	-97.8809415
H12	18.7589826	-97.8740654	H32	18.7652671	-97.880206
H13	18.7578621	-97.8739288	H33	18.7674815	-97.8810256
H14	18.7573474	-97.8728584	H34	18.7658358	-97.8814679
H15	18.7563079	-97.8746456	H35	18.7658076	-97.8826712
H16	18.7481427	-97.8736203	H36	18.7656958	-97.8826207
H17	18.7476897	-97.8726518	H37	18.7641939	-97.8840813
H18	18.7457092	-97.870865	H38	18.7635895	-97.8861715
H19	18.7443101	-97.8706557	H39	18.7641672	-97.8903257
H20	18.7408237	-97.8667436	H40	18.7628396	-97.892291

*En la Tabla 4.1, se encuentran enlistadas las ubicaciones de los distintos hidrantes que componen el sistema. Esto con el fin de poder estimar el caudal de salida en cada uno de los puntos de interés.*

## 4.4.2

## DATOS DE TUBERÍA

Tabla 4.2 Datos de red de distribución

Hidrante	Longitud[m]	Accesorios				
		Codos 90°	Codo 45°	T	Y	Unión
H1	63.98	1	0	0	0	9
H2	95.17	0	0	2	0	15
H3	100.13	0	0	4	0	16
H4	89.2	0	0	2	0	14
H5	122.42	0	0	4	0	20
H6	110.48	0	0	3	0	18
H7	182.81	1	0	3	0	30
H8	338.45	0	0	6	0	56
H9	376.26	1	0	4	0	62
H10	627.4	2	0	5	0	104
H11	628.34	2	0	6	0	104
H12	964.01	2	0	7	0	160
H13	907.66	2	0	8	0	151
H14	1099.89	3	0	9	0	183
H15	1304.36	4	0	10	0	217
H16	674.77	0	0	8	0	112
H17	676.93	0	0	9	0	112
H18	685.13	0	0	10	0	114
H19	888.4	0	0	11	0	148
H20	652.8	1	0	7	0	108
H21	1181.63	3	0	11	1	196
H22	1577.73	3	0	12	1	262
H23	1839.91	5	0	12	1	306
H24	420.67	0	0	6	0	70
H25	862.62	2	0	7	0	143
H26	1033.24	1	0	8	0	172
H27	1038.01	1	0	9	0	173
H28	1034.73	1	0	10	0	172
H29	1181.81	2	0	10	0	196
H30	1251.5	3	0	10	0	208
H31	1422.66	3	0	10	0	237
H32	2244.95	3	0	10	1	374
H33	2329.6	3	0	10	1	388
H34	2614.32	3	0	11	1	435
H35	2730.44	3	0	12	1	455
H36	3260.59	4	1	12	1	543
H37	2871.63	4	1	13	1	478
H38	2959.76	5	3	14	1	493
H39	3054.79	6	3	14	1	509
H40	3116.96	6	3	14	1	519

Como se mencionó en el punto anterior, al desconocerse la condición actual del sistema de bombeo se realizaron actividades de levantamiento a lo largo de la tubería, como resumen de estos trabajos en la Tabla 4.2 se enlistan las longitudes de la tubería recta que llega a cada uno de los hidrantes, así como la cantidad de accesorios que se estiman se pueden encontrar a lo largo del recorrido desde la bomba hasta el hidrante de salida, todo esto con el fin de estimar la carga hidráulica a la que se somete el sistema en los distintos puntos de extracción.

## 4.4.3

**DATOS DE LA BOMBA**

A continuación, en la Fig. 4.9 se presentan los datos proporcionados por la empresa encargada de la instalación de bomba actual, dicha organización no brindó su consentimiento para poder ser citada en el presente proyecto.

	<b>FORMATO No. 3 REPORTE DE INSTALACIÓN DEL EQUIPO DE BOMBEO</b>
<b>PROGRAMA DE MODERNIZACION Y TECNIFICACION DE UNIDADES DE RIEGO</b>	
TIPO DE BOMBA: SUMERGIBLE	
FECHA DE INSTALACION: 03 DE SEPTIEMBRE DE 2012	
POZO: SOCIEDAD DE PEQUEÑOS PROPIETARIOS ZOTOLCOYOLT SPR DE RL	
<b>MOTOR</b> MARCA : KSB No. DE SERIE: B5E011 POTENCIA: 60 HP	<b>CUERPO DE TAZONES</b> MARCA: KSB MODELO: UPA 250C-150/2 SERIE: B5E011 DIAM. EXTERIOR: 6" No. DE PASOS: 2 CURVA IMPULSOR: ABIERTO TIPO IMPULSORES: ACERO INOXIDABLE
<b>BOMBA</b> MARCA: KSB No. DE SERIE : B5E011 CAPACIDAD: DIAM. DESCARGA: 6" DIAM. COLUMNA: 6"	
<b>COLUMNA</b> LUBRICACIÓN _____ DIAM. COLUMNA: 4" DIAM. FLECHA _____ LONGITUD: 54.90 MTS DIAM. CAMISA: NO TIENE No. DE TRAMOS : 9 TRAMOS DE 6.10 MTS	<b>COLADOR</b> TIPO: REJILLA DIAM.: 6" LONGITUD: 20 CM
<b>OBSERVACIONES DE LA INSTALACION:</b>	
<b>EL EQUIPO INSTALADO QUEDA TRABAJANDO EN OPERACIONES NORMALES CON LOS SIGUIENTES AMPERAJES: 84-84-83 AMPS POR FASES Y CON LOS SIGUIENTES VOLTAJES DE OPERACIÓN: 440-445-440 VOLTS SE ANEXA CURVA DEL EQUIPO .</b>	

Fig. 4.9 Reporte de instalación de la bomba

Del reporte que se muestra en la imagen anterior, se pudo determinar el modelo de la bomba así como su curva de desempeño. (Ver Fig. 4.10)

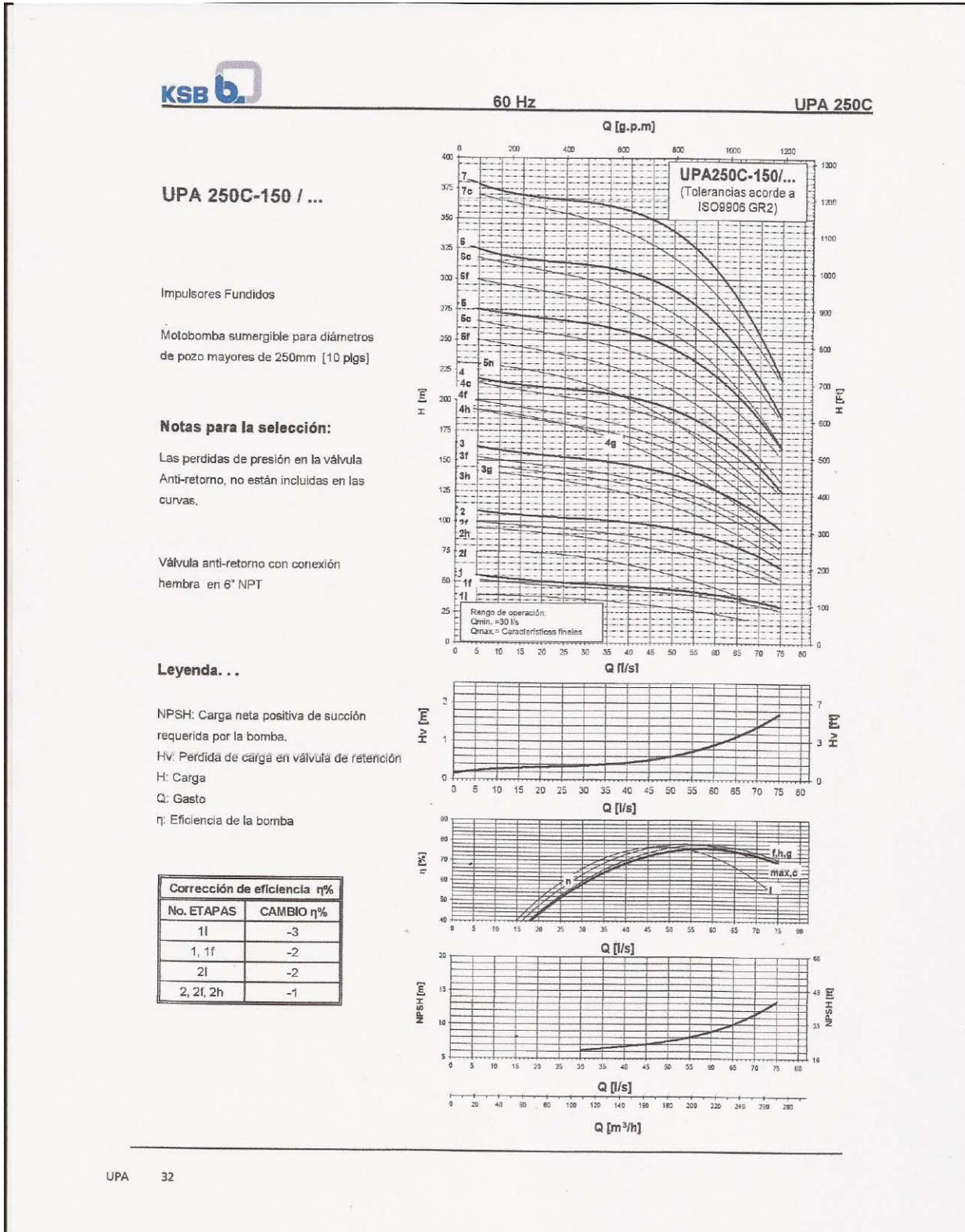


Fig. 4.10 Curva de desempeño de la bomba

## 4.4.4

## CURVAS DE ELEVACIÓN

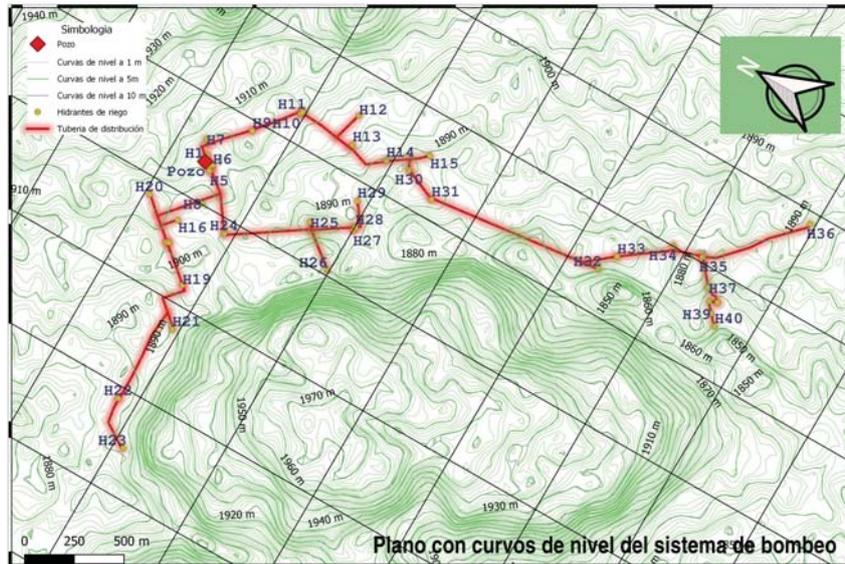


Fig. 4.11 Plano de tubería con curvas de nivel

El plano de la Fig. 4.11 se puede consultar con mayor detalle en la sección de ANEXOS. (Ver D.2)

Tabla 4.3 Alturas de salida de cada hidrante

Identificador	Altitud [m.s.n.m.]	Identificador	Altitud [m.s.n.m.]
H1	1916	H21	1866
H2	1901	H22	1867
H3	1896	H23	1867
H4	1893	H24	1863
H5	1897	H25	1870
H6	1903	H26	1873
H7	1901	H27	1894
H8	1893	H28	1889
H9	1891	H29	1896
H10	1900	H30	1864
H11	1900	H31	1901
H12	1898	H32	1904
H13	1894	H33	1900
H14	1898	H34	1901
H15	1882	H35	1899
H16	1867	H36	1897
H17	1862	H37	1899
H18	1867	H38	1892
H19	1879	H39	1879
H20	1878	H40	1892

Otro de los requerimientos que se requieren para determinar la carga hidráulica son los cambios de elevación que pudieran existir entre el punto de succión y la descarga, por lo que gracias a imágenes satelitales se puede estimar las variaciones de elevación en las zonas. En la Tabla 4.3 se muestran las respectivas elevaciones de los hidrantes.

4.4.5

**DIAGRAMA UNIFILAR DEL POZO**

En la Fig. 4.12 se muestra de manera sencilla los componentes eléctricos que integran el sistema de bombeo.

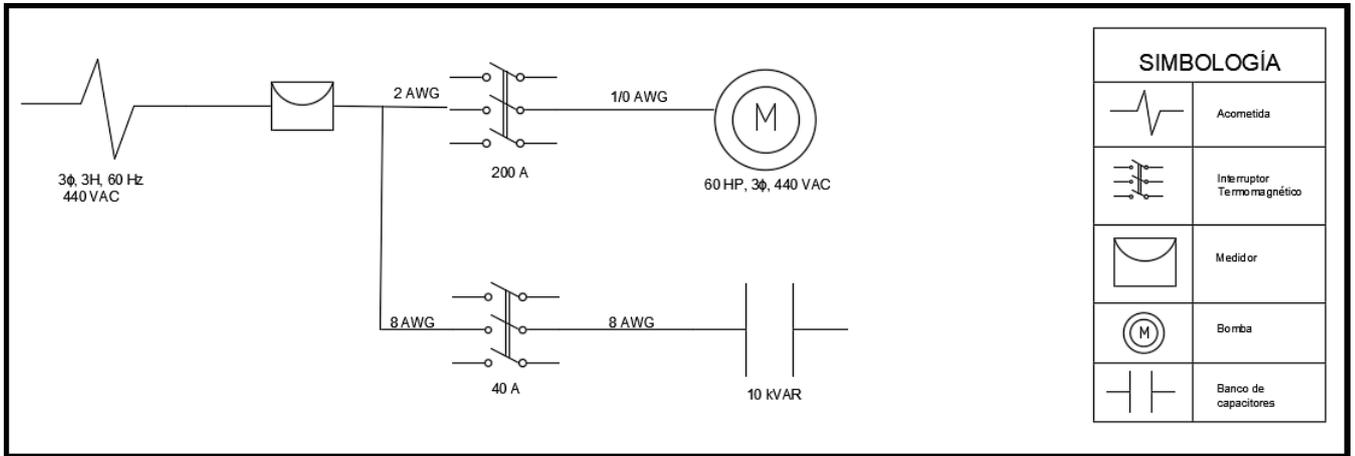


Fig. 4.12 Diagrama Unifilar del sistema de bombeo

## 4.4.6

**FACTURACIÓN ELÉCTRICA**

En la Tabla 4.4 se muestran los consumos que se han tenido en los últimos meses, cabe hacer la mención que no existe información disponible concernientes a los meses de junio a septiembre del 2018. Un dato adicional que se obtuvo durante el levantamiento es que la actual acometida se encuentra en una tarifa tipo 9N<sup>1</sup> y la realización de las mediciones para efecto de cobro se realizan en la parte de baja tensión.

**Tabla 4.4** Facturación eléctrica del sistema de bombeo

Periodo de Facturación	Consumo Noche [KWh]	Consumo Día [kWh]	KVArh	KVAh	f.p.	Tarifa
Oct17-Nov17	7724	16977	13100	27959.7818	88.34	\$ 12,464.00
Nov17-Dic17	7361	17858	13665	28683.2736	87.92	\$ 12,921.00
Dic17-Ene18	7012	17045	12863	27279.9563	88.19	\$ 13,428.00
Ene18-Feb18	7351	14988	11857	25290.6973	88.33	\$ 11,547.00
Feb18-Mar18	8658	17960	13412	29806.0341	89.30	\$ 13,710.00
Mar18-Abr-18	6615	14280	10550	23407.3391	89.27	\$ 10,817.00
Abr18-May18	4969	11440	8515	18486.7657	88.76	\$ 8,590.00
May18-Jun18	4322	9480	7417	15668.666	88.09	\$ 7,217.00
Jun18-Jul18	0	0	0	0	0	0
Jul18-Ago18	0	0	0	0	0	0
Ago18-Sep18	0	0	0	0	0	0
Sep18-Oct18	0	0	0	0	0	0
Oct18-Nov18	3939	10014	7305	15749.5789	88.59	\$ 7,408.00
Nov18-Dic18	0	0	0	0	0	0
Dic18-Ene19	6220	12644	11005	21839.4258	86.38	\$ 10,212.00
Ene19-Feb19	6120	13230	10401	21968.2339	88.08	\$ 10,435.00
Feb19-Mar19	8479	16824	3087	25490.6135	88.82	\$ 13,428.00
Mar19-Abr19	7124	15513	21360	31123.6786	89.38	\$ 12,111.00
Abr19-May19	7985	16587	12246	27454.4659	89.50	\$ 13,053.00
May19-Jun19	1690	5687	3661	8235.47509	89.58	\$ 4,144.00
Jun18-Jul19	1451	7020	4592	9635.57497	87.91	\$ 4,966.00
Jul19-Ago19	4044	4044	8302	11590.468	88.07	\$ 8,596.00
Ago19-Sep19	4591	11513	8494	18206.7804	88.45	\$ 8,824.00
Sep19-Oct19	3820	9631	7255	15282.8147	88.01	\$ 7,401.00
Oct19-Nov19	4991	12569	9788	20103.6948	87.35	\$ 9,698.00
Nov19-Dic19	5555	11703	9751	19822.224	87.06	\$ 9,341.00

<sup>1</sup>En el capítulo PROPUESTAS se hará una descripción más profunda referente a los tipos de tarifas y su utilización

## 4.5 MEDICIONES ELÉCTRICAS

A continuación se muestran en la Tabla 4.5 los datos obtenidos mediante el analizador de redes HT VEGA 78, los cuales representan los parámetros eléctricos de consumo de la bomba del caso de estudio.

Tabla 4.5 Datos generados por el analizador de redes

V12 <sub>avg</sub> [V]	V23 <sub>avg</sub> [V]	V31 <sub>avg</sub> [V]	freq <sub>avg</sub> [Hz]	I1 <sub>avg</sub> [A]	I2 <sub>avg</sub> [A]	I3 <sub>avg</sub> [A]	Pt <sub>avg</sub> [W]	Qti <sub>avg</sub> [VAr]	St <sub>avg</sub> [VA]	Pf <sub>avg</sub>	V12 <sub>avg</sub> [V]	V23 <sub>avg</sub> [V]	V31 <sub>avg</sub> [V]	freq <sub>avg</sub> [Hz]	I1 <sub>avg</sub> [A]	I2 <sub>avg</sub> [A]	I3 <sub>avg</sub> [A]	Pt <sub>avg</sub> [W]	Qti <sub>avg</sub> [VAr]	St <sub>avg</sub> [VA]	Pf <sub>avg</sub>
446.2	447.5	447.5	60.02	58.23	58.6	60.02	36070	28520	45980	0.784	446.7	447.2	447.3	60.02	58.68	58.47	59.69	36110	28540	46030	0.784
446.1	447.5	447.4	60.03	58.19	58.63	60.06	36120	28520	46030	0.784	446.8	447.2	447.4	60.02	58.68	58.43	59.67	36080	28560	46020	0.784
445.5	447	447	60.04	58.16	58.53	60.13	36120	28420	45960	0.785	446.7	447.1	447.5	60.02	58.75	58.3	59.8	36110	28560	46040	0.784
445.7	447.1	447	60.03	58.21	58.6	60.03	36120	28460	45990	0.785	446.9	447.3	447.8	60.02	58.76	58.31	59.87	36120	28620	46090	0.783
445.9	447.3	447.1	60.04	58.24	58.63	60	36140	28470	46010	0.785	446.9	447.3	447.7	60.02	58.77	58.34	59.74	36100	28610	46060	0.783
445.9	447.2	447	60.05	58.3	58.65	59.97	36160	28450	46010	0.785	446.9	447.4	447.7	60	58.69	58.37	59.74	36070	28620	46050	0.783
446	447.4	447.2	60.05	58.27	58.7	60.01	36170	28490	46040	0.785	446.7	447.1	447.5	59.99	58.68	58.29	59.67	36020	28580	45990	0.783
445.8	447.3	447.1	60.05	58.23	58.64	60.08	36170	28470	46030	0.785	446.8	447.3	447.6	59.97	58.64	58.28	59.66	35990	28620	45980	0.782
445.7	447.2	447	60.05	58.16	58.62	60.08	36140	28450	45990	0.785	446.7	447.3	447.5	59.97	58.58	58.33	59.69	36000	28600	45980	0.782
445.8	447.2	447	60.04	58.17	58.66	60	36120	28450	45990	0.785	446.6	447.3	447.4	59.97	58.51	58.34	59.7	35990	28580	45960	0.783
445.8	447.4	447.1	60.03	58.12	58.69	60.03	36120	28480	46000	0.785	446.6	447.2	447.5	59.98	58.59	58.3	59.8	36030	28590	46000	0.783
445.9	447.5	447	60.02	58.09	58.73	59.9	36080	28490	45980	0.784	446.6	447.2	447.5	59.97	58.53	58.31	59.75	36000	28590	45970	0.783
445.9	447.4	447.1	60.01	58.14	58.62	59.93	36060	28500	45960	0.784	446.6	447.3	447.5	59.97	58.48	58.34	59.73	35980	28600	45970	0.782
446.2	447.5	447.3	60	58.2	58.6	59.89	36050	28540	45980	0.784	446.5	447.3	447.3	59.98	58.5	58.46	59.71	36030	28570	45980	0.783
446	447.1	447.1	60.01	58.33	58.5	59.9	36070	28490	45970	0.784	446.4	447.1	447.2	59.99	58.51	58.41	59.74	36040	28530	45970	0.784
445.8	447	446.9	60.02	58.28	58.53	59.9	36080	28450	45950	0.785	446.3	447	447.2	60	58.52	58.39	59.76	36050	28510	45960	0.784
445.8	446.9	447	60.01	58.31	58.44	59.96	36070	28450	45950	0.785	446.4	447.1	447.2	60.01	58.57	58.42	59.75	36070	28530	45990	0.784
445.6	446.8	446.9	60	58.25	58.41	59.98	36050	28430	45910	0.785	446.3	446.9	447.1	60.01	58.59	58.4	59.79	36090	28500	45990	0.784
445.6	446.9	446.9	60	58.24	58.42	59.99	36050	28450	45920	0.785	446.3	446.9	447.2	60.02	58.64	58.4	59.8	36120	28500	46010	0.785
445.7	446.9	446.9	60.01	58.23	58.41	59.95	36040	28440	45910	0.785	446.1	446.7	446.9	60.03	58.64	58.39	59.79	36120	28450	45980	0.785
445.5	446.8	446.8	60	58.21	58.45	60	36060	28420	45910	0.785	446	446.7	446.9	60.01	58.58	58.37	59.74	36070	28440	45940	0.785
445.6	446.8	446.8	59.99	58.19	58.4	59.93	36010	28440	45880	0.784	446.3	446.8	447.1	60.01	58.63	58.33	59.75	36070	28490	45970	0.784
445.6	446.8	446.8	59.99	58.16	58.53	59.91	36030	28460	45910	0.784	446.3	447	447.3	60.03	58.58	58.37	59.85	36100	28500	46000	0.784
445.8	447.1	447	60	58.18	58.49	59.91	36030	28470	45920	0.784	446.1	446.8	447	60.03	58.59	58.43	59.8	36120	28460	45990	0.785
445.8	447	447	60.01	58.27	58.49	59.97	36080	28460	45960	0.785	446.1	446.8	447	60.03	58.59	58.42	59.82	36120	28460	45990	0.785
445.7	447	447.1	60.02	58.26	58.41	60.07	36080	28460	45960	0.785	446.2	446.8	446.9	60.03	58.62	58.44	59.74	36110	28460	45980	0.785
445.9	447	447.2	60.01	58.33	58.44	60	36090	28480	45980	0.784	446.2	446.7	446.8	60.03	58.68	58.45	59.71	36120	28440	45980	0.785
445.8	447	447.2	60.02	58.28	58.41	60.06	36090	28470	45970	0.785	446.2	446.7	447	60.03	58.7	58.38	59.75	36120	28460	45990	0.785
445.7	446.9	447	60.02	58.27	58.46	59.96	36080	28440	45940	0.785	446.2	446.5	446.8	60.04	58.76	58.41	59.67	36130	28420	45970	0.785
445.6	446.7	446.6	60.01	58.33	58.51	59.86	36080	28400	45920	0.785	445.9	446.4	446.7	60.03	58.66	58.36	59.75	36110	28390	45940	0.786
445.9	446.9	446.9	60.01	58.36	58.54	59.86	36090	28450	45960	0.785	445.8	446.4	446.8	60.03	58.62	58.27	59.84	36100	28390	45930	0.786
445.8	446.9	446.8	60.02	58.38	58.51	59.86	36090	28440	45950	0.785	445.7	446.4	446.9	60.03	58.56	58.25	59.96	36110	28400	45940	0.786
445.6	446.6	446.7	60	58.39	58.41	59.83	36050	28410	45900	0.785	445.7	446.4	446.8	60.03	58.57	58.31	59.88	36110	28400	45940	0.786
445.6	446.6	446.5	60	58.34	58.51	59.76	36040	28400	45890	0.785	446.7	447.8	448	60	58.29	58.4	60.05	36060	28660	46070	0.782
445.8	446.8	446.6	60.02	58.37	58.56	59.75	36080	28400	45920	0.785	446.9	448.1	448.3	60.02	58.32	58.46	60.12	36110	28700	46130	0.782
445.7	446.7	446.7	60.04	58.4	58.54	59.84	36120	28400	45950	0.786	446.8	448	448	60.01	58.34	58.49	60.05	36110	28660	46110	0.783
445.6	446.6	446.8	60.02	58.42	58.42	59.93	36110	28400	45940	0.786	446.6	447.9	447.9	60	58.25	58.49	60.08	36090	28650	46080	0.783
445.6	446.7	446.7	60.01	58.32	58.44	59.92	36080	28400	45910	0.785	447	448.1	448.1	60.03	58.41	58.57	59.98	36140	28690	46150	0.783
445.3	446.5	446.6	60.01	58.26	58.42	59.95	36070	28360	45880	0.786	446.9	448.1	448	60.02	58.35	58.61	59.99	36140	28680	46130	0.783
445.4	446.7	446.8	60.01	58.23	58.4	59.99	36060	28390	45890	0.785	446.9	448	448.1	60.03	58.4	58.49	60.01	36130	28670	46120	0.783
445.5	446.6	446.8	60.01	58.3	58.32	59.98	36040	28400	45890	0.785	447	448	448.2	60.01	58.42	58.46	59.99	36100	28700	46120	0.782
445.4	446.5	446.8	60.01	58.29	58.31	60.07	36080	28380	45910	0.785	447.1	448.1	448.3	60.01	58.46	58.41	59.99	36090	28710	46120	0.782
445.2	446.3	446.8	60.03	58.3	58.26	60.18	36110	28350	45910	0.786	447.1	447.9	448.1	59.99	58.48	58.38	59.87	36050	28700	46080	0.782
445.5	446.6	446.9	60.04	58.36	58.4	60.11	36140	28400	45970	0.786	447	448	448	59.98	58.37	58.42	59.88	36020	28690	46060	0.782
445.5	446.6	446.9	60.03	58.33	58.38	60.04	36100	28400	45940	0.786	446.9	447.9	447.9	59.97	58.29	58.45	59.87	36000	28690	46040	0.782
445.8	446.8	447.1	60.02	58.38	58.31	60.05	36090	28450	45950	0.785	447	448	448	59.97	58.35	58.47	59.85	36020	28710	46060	0.782
445.7	446.7	447.1	60.03	58.4	58.29	60.12	36120	28430	45970	0.785	447.2	448.1	448.1	59.98	58.43	58.46	59.84	36040	28730	46090	0.781
445.7	446.6	447	60.04	58.45	58.31	60.01	36120	28400	45950	0.786	447.7	448.5	448.4	59.99	58.49	58.59	59.74	36060	28800	46150	0.781
445.7	446.6	446.9	60.03	58.47	58.36	59.94	36110	28410	45940	0.785	447.3	448	447.9	59.98	58.54	58.5	59.64	36020	28720	46070	0.781
445.9	446.7	447	60.02	58.49	58.35	59.91	36090	28440	45950	0.785	447.3	447.9	448	59.98	58.62	58.43	59.68	36040	28710	46080	0.782
445.9	446.7	447.1	60.02	58.47	58.29	59.97	36090	28440	45950	0.785	447.1	447.8	447.8	59.99	58.56	58.48	59.71	36060	28670	46070	0.782
445.8	446.6	447.1	60.03	58.5	58.29	60.04	36120	28430	45970	0.785	447	447.6	447.5	59.98	58.58	58.5	59.57	36030	28640	46020	0.782
445.9	446.7	447	60.03	58.54	58.34	59.94	36120	28430	45970	0.785	447.4	4									

## 5.1 DETERMINACIÓN DE VOLUMEN DE RIEGO

Para poder realizar el análisis del correcto funcionamiento del sistema de riego, fue necesario determinar cual es la cantidad de agua que se requiere para cada uno de los sembradíos. En las siguientes secciones se menciona cómo se llevó a cabo esta tarea. Cabe hacer mención que, dado que en la actualidad no se cuenta con una difusión adecuada del conocimiento de las técnicas de riego, aproximadamente el 90 % de los sembradíos realizan las tareas de riego de manera empírica.

### 5.1.1 ESTIMACIÓN DE ÁREA DE RIEGO

Empleando las herramientas Google Earth y QGIS, se realizaron los polígonos que representan el área de cada una de las parcelas de riego, en la Fig. 5.1 se muestra la exportación de los polígonos del levantamiento en campo.

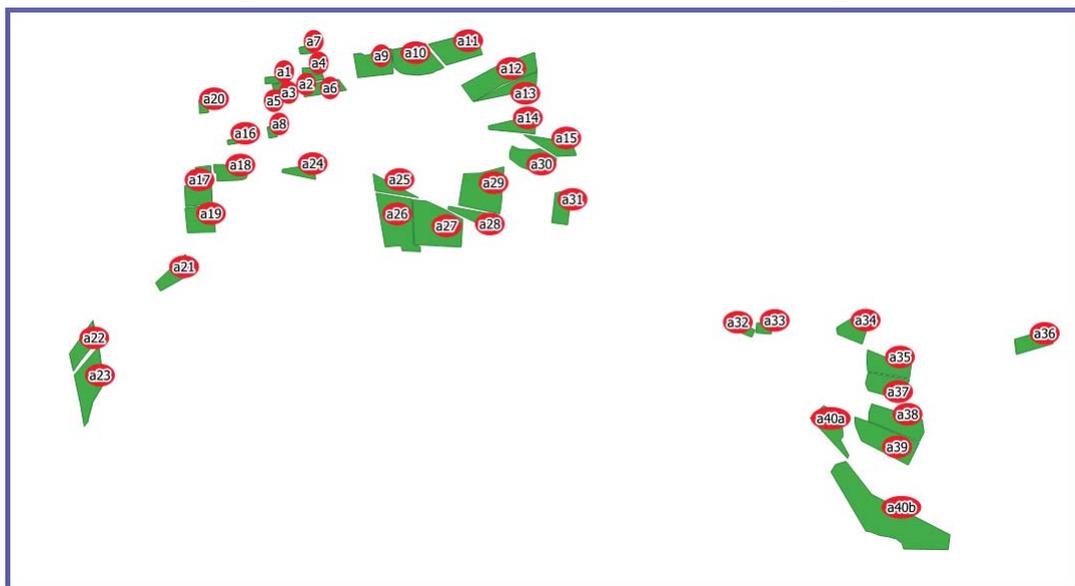


Fig. 5.1 Polígonos de áreas de riego

Gracias a esta exportación se extrajeron los datos de la Tabla 5.1 que se muestra a continuación.

**Tabla 5.1** Áreas de las parcelas de riego

Parcela	Área [m <sup>2</sup> ]	Parcela	Área [m <sup>2</sup> ]
1	2492	21	7545
2	1791	22	8765
3	1712	23	18400
4	1711	24	4478
5	644	25	5492
6	7250	26	25796
7	1761	27	28473
8	1403	28	8050
9	13312	29	23827
10	17511	30	10703
11	15839	31	8112
12	22226	32	2101
13	8611	33	2405
14	7992	34	9488
15	8339	35	13126
16	1044	36	8926
17	13620	37	12217
18	6786	38	16855
19	10935	39	21041
20	1651	40a	12574
		40b	55916 †

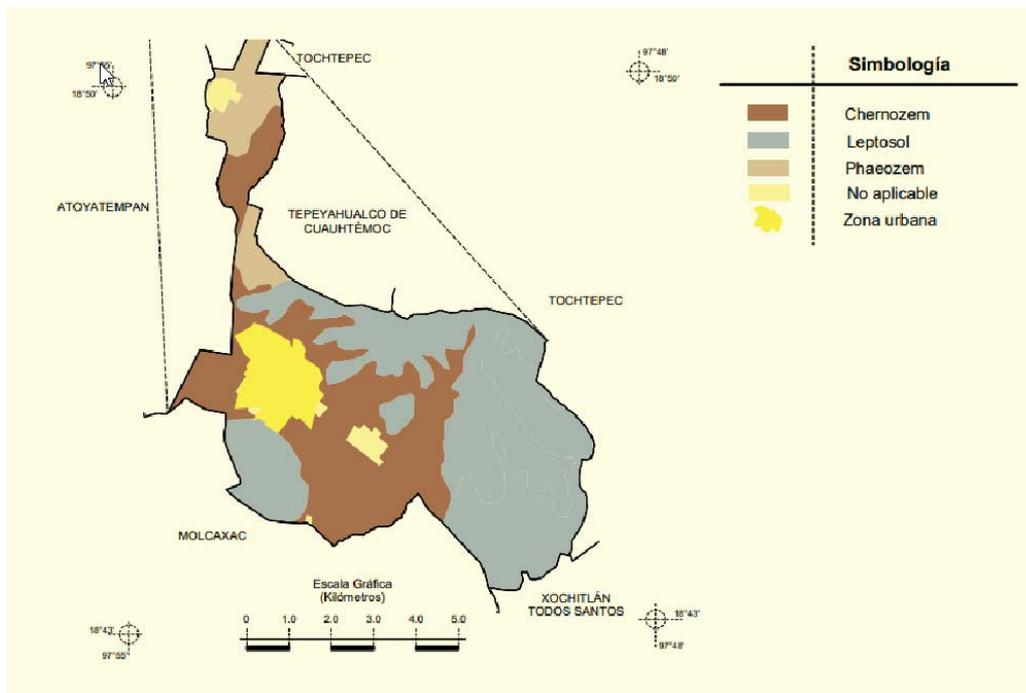
† En el caso de las secciones 40a y 40b pertenecen al mismo dueño y se riegan mediante un mismo hidrante, aunque sean terrenos distintos, por lo que en esta tabla se hace la consideración de separarlas. Sin embargo, en las secciones posteriores se considera como una sola parcela

## 5.1.2

**REQUERIMIENTO HÍDRICO POR PLANTACIÓN**

De acuerdo a la plantación que se intenta regar, en necesario conocer sus requerimientos de agua, así como las características del terreno en que se está sembrando.

De acuerdo con (INEGI, 2009) en la Fig. 5.2 se muestra la distribución de los suelos dominantes en el municipio en que se realiza el estudio.



**Fig. 5.2** Suelos dominantes de Huitziltepec, Puebla

Esto muestra que en la zona de cultivo predomina el tipo de suelo **Chernozem** seguido por **Leptosol**.

El Chernozem, tiene las siguientes características físicas : *Los Chernozems poseen propiedades físicas favorables. El volumen total de poros del horizonte Ah cuenta con 55 a 60 % y el del subsuelo tiene de 45 a 55 %. Los Chernozems tienen buenas propiedades de retención de humedad; el contenido reportado es de 33 % a “capacidad de campo”<sup>1</sup> y 13 % en “punto de marchitez permanente”<sup>2</sup>, sugieren una capacidad de agua disponible (CAD) de casi 20 % de volumen. La estructura estable de micro-agregados (“migajosa”) del horizonte Ah-rico en humus, representa una combinación favorable de la porosidad capilar y no capilar y hace a estos suelos altamente aceptables para agricultura de riego.* (Juan Jose Ibáñez, 2019)

Mientras que por su parte el tipo Leptosol, es un suelo caracterizado por su poca capacidad de campo al estar compuesto en su mayoría por una textura arenosa.

Con estos datos, se pueden determinar los requerimientos que cada uno de los sembradíos requiere para una adecuada producción, en la siguiente tabla (Tab. 5.2) se muestran las estimaciones calculadas de la lámina de agua requerida por los cultivos para los dos tipos de suelos que se encuentran en la localidad.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ver sección 2.1.1

<sup>2</sup>Ver sección 2.1.1

<sup>3</sup>Para la realización de estas estimaciones se empleo la ecuación 2.3 que se muestra en el capítulo 2. En ella se emplean los datos mencionados en el párrafo anterior (capacidad de campo y punto de marchitez).

Cultivo	AU[mm] Chernozem	AU[mm] Leptosol
Maíz	195	56.25
Alfalfa	234	67.5
Frijol	130	37.5
Jitomate	104	30
Citricos	312	90
Lechuga	156	45
Chile	130	37.5
Calabaza	260	75

**Tabla 5.2** Lámina de agua calculada requerida por cultivo en los distintos tipos de suelo

Con los datos de la Tabla 5.2 y las áreas que se muestran en la Tabla 5.1, se produjo la siguiente tabla (Tab. 5.3) en la que se muestra el volumen requerido para cada una de las parcelas<sup>4</sup>

Parcela	Cultivo	AU [mm]	Área [m <sup>2</sup> ]	Volumen de agua requerido [m <sup>3</sup> ]
1	-	-	2492	0
2	Alfalfa	234	1791	419.094
3	Citricos	312	1712	534.144
4	Lechuga	156	1711	266.916
5	Citricos	312	644	200.928
6	Alfalfa	234	7250	1696.5
7	Calabaza	195	1761	343.395
8	Frijol	130	1403	182.39
9	Lechuga	156	13312	2076.672
10	Maiz	195	17511	3414.645
11	Frijol	130	15839	2059.07
12	Calabaza	260	22226	5778.76
13	Alfalfa	234	8611	2014.974
14	Maiz	195	7992	1558.44
15	Jitomate	104	8339	867.256
16	Maiz	195	1044	203.58
17	Alfalfa	234	13620	3187.08
18	Citricos	312	6786	2117.232
19	Maiz	195	10935	2132.325
20	Maiz	195	1651	321.945
21	Maiz	195	7545	1471.275
22	Alfalfa	234	8765	2051.01
23	Frijol	130	18400	2392
24	-	-	4478	0
25	Maiz	195	5492	1070.94
26	Alfalfa	234	25796	6036.264
27	Jitomate	104	28473	2961.192
28	Maiz	195	8050	1569.75
29	Frijol	130	23827	3097.51
30	Alfalfa	234	10703	2504.502
31	Frijol	130	8112	1054.56
32	Jitomate	104	2101	218.504
33	Jitomate	104	2405	250.12
34	Chile	130	9488	1233.44
35	Calabaza	260	13126	3412.76
36	Citricos	312	8926	2784.912
37	Alfalfa	312	12217	3811.704
38	Jitomate	104	16855	1752.92
39	Frijol	130	21041	2735.33
40	Maiz	195	68490	13355.55

**Tabla 5.3** Determinación de volumen de agua requerido por sitio

Con base en el análisis mostrado en esta sección, se generaron las siguientes conclusiones:

- El requerimiento promedio de agua es de : **2187m<sup>3</sup>** <sup>5</sup>
- El consumo total aproximado del requerimiento de agua es de: **1873**  $\frac{m^3 \text{ de agua}}{\text{ha}}$  <sup>6</sup>

<sup>4</sup>Al momento de realizar el presente trabajo

<sup>5</sup>cada siete días, este valor es en función del promedio entre los periodos de riego que actualmente se emplean.

<sup>6</sup>Esto en consideración de que la metodología de riego actual es mediante la demanda gestionada y se realiza mensualmente.

## 5.2 CÁLCULO DE CARGA HIDRÁULICA

Como se menciona en el Capítulo 2 para la determinación de la carga a la que es sometida la bomba, es necesario conocer los elementos que generan carga hidráulica al sistema, el método para la determinación se describe a continuación.

### 5.2.1

#### PÉRDIDAS POR CARGA DE ELEVACIÓN

Un elemento adicional a evaluar es la altura que tiene que vencer la bomba para poder disponer del agua, de acuerdo a los datos que se muestran en la Sección 4.4.3 y en la Sección 4.4.4 la carga que tiene que vencer el sistema con respecto al punto de succión y la salida de cada uno de los hidrantes, es solo la columna de agua debido a que los puntos de extracción se encuentra a una altitud menor a la que se tiene en la obra de toma, **la carga que representan las pérdidas de elevación es de 54.9 [m]**.

### 5.2.2

#### PÉRDIDAS MECÁNICAS (ACCESORIOS Y FRICCIÓN)

De acuerdo con la ecuación 2.9, parte de los elementos a calcular dentro de la ecuación de balance energético, se encuentran las pérdidas mecánicas, las cuales son generadas por la fricción de la tubería y accesorios.

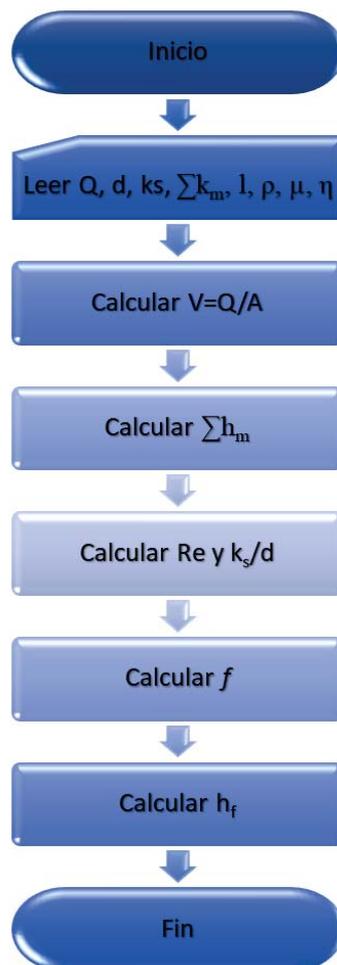


Fig. 5.3 Procedimiento para el cálculo de pérdidas mecánicas

En la Fig. 5.3 se muestra un diagrama que representa el procedimiento para el cálculo de las pérdidas mecánicas, y se describe a continuación:

1. **Obtención de la velocidad media con la que se conduce el fluido**

2. **Calcular  $\sum h_m$**  Se determina las pérdidas debido a accesorios a lo largo de la trayectoria.

$$\sum h_m = \left( \sum k_m \right) \frac{v^2}{2g} \quad (5.1)$$

3. *Se calcula el número de Reynolds y la rugosidad relativa.*

4. *Se calcula el factor de fricción.* En este caso se empleará la ecuación de Colebrook-White<sup>7</sup>:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (5.2)$$

5. **Se calculan las pérdidas por el factor de fricción** Esto se realiza mediante la ecuación de Darcy-Weisbach.

$$h_f = f \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (5.3)$$

Donde:

- $v$  es la velocidad media del fluido
- $h_m$  son las pérdidas mecánicas (tubería y accesorios)
- $k_m$  son los coeficientes de pérdidas por accesorios
- $g$  es la aceleración gravitatoria
- $k_s$  es el coeficiente de fricción para la tubería
- $f$  es el factor de fricción
- $Re$  es el número de Reynolds
- $l$  es la longitud de la tubería
- $d$  es el diámetro de la tubería.

A partir de los datos obtenidos y que se muestran en la sección 4.4.2 se realizó la determinación de las pérdidas derivada de los accesorios.

<sup>7</sup>En este caso se emplea esta versión de la ecuación derivado de que para las condiciones de operación y evaluando el número de Reynolds resultó que el sistema opera como un flujo turbulento (Saldarriaga, 2016)

**Tabla 5.4** Pérdidas mecánicas debidas a accesorios

Hidrante	$\sum k_m$	$h_m$ [m]	Hidrante	$\sum k_m$	$h_m$ [m]
H1	3.6	0.32009117	H21	73.05	6.49518325
H2	6.5	0.57794238	H22	93.85	8.34459888
H3	8.8	0.78244507	H23	108.85	9.67831208
H4	6.2	0.55126812	H24	27	2.40068375
H5	10	0.88914213	H25	51.7	4.59686481
H6	8.4	0.74687939	H26	60.5	5.37930988
H7	12.9	1.14699335	H27	61.8	5.49489836
H8	22.8	2.02724405	H28	62.5	5.55713831
H9	23.5	2.089484	H29	70.6	6.27734343
H10	38	3.37874009	H30	75.1	6.67745739
H11	39	3.4676543	H31	83.8	7.45101104
H12	56.8	5.05032729	H32	125.45	11.154288
H13	55.1	4.89917313	H33	129.65	11.5277277
H14	66.6	5.92168658	H34	144.75	12.8703323
H15	78.7	6.99754856	H35	151.75	13.4927318
H16	41.6	3.69883126	H36	179.47	15.9574338
H17	42.6	3.78774547	H37	160.97	14.3125209
H18	44.2	3.93000821	H38	168.21	14.9562598
H19	55.4	4.9258474	H39	173.91	15.4630708
H20	40.3	3.58324278	H40	176.91	15.7298134

Posteriormente se calculó el factor de fricción que se tiene en la tubería, dado que el diámetro de la tubería permanece constante en todo el sistema, de manera iterativa se determinó que  $f = 0.015315$ . Por lo que en la siguiente tabla (Tabla 5.5), se presentan las pérdidas por fricción que se tienen en cada una de las posibles salidas del sistema.

**Tabla 5.5** Pérdidas mecánicas debidas a la fricción a lo largo de la tubería

Hidrante	$h_f$ [m]	Hidrante	$h_f$ [m]
H1	1.04117312	H21	10.8215324
H2	1.31411135	H22	14.287734
H3	1.35751544	H23	16.5820253
H4	1.26186892	H24	4.16250479
H5	1.55257132	H25	8.02993177
H6	1.44808647	H26	9.52299748
H7	2.08103362	H27	9.56473892
H8	3.44301198	H28	9.53603621
H9	3.77388066	H29	10.8231075
H10	5.97156278	H30	11.4329525
H11	5.97978856	H31	12.9307436
H12	8.91717789	H32	20.1264593
H13	8.42406891	H33	20.8672166
H14	10.1062399	H34	23.3587514
H15	11.8955211	H35	24.3748972
H16	6.38608935	H36	29.0141469
H17	6.40499113	H37	25.6104261
H18	6.47674789	H38	26.3816363
H19	8.25552803	H39	27.2132272
H20	6.19383373	H40	27.7572659

De manera resumida, la carga a la que es sometida la bomba se determinó de la siguiente manera:

$$H = z + h_f + h_m \quad (5.4)$$

De tal forma que la carga que se tiene la bomba para cada uno de los hidrantes queda de la siguiente manera:

### 5.2.3

**Tabla 5.6** Carga total de la bomba para cada uno de los hidrantes

Hidrante	$H$ [m]	Hidrante	$H$ [m]
H1	56.2612643	H21	72.2167156
H2	56.7920537	H22	77.5323329
H3	57.0399605	H23	81.1603373
H4	56.713137	H24	61.4631885
H5	57.3417134	H25	67.5267966
H6	57.0949659	H26	69.8023074
H7	58.128027	H27	69.9596373
H8	60.370256	H28	69.9931745
H9	60.7633647	H29	72.0004509
H10	64.2503029	H30	73.0104099
H11	64.3474429	H31	75.2817547
H12	68.8675052	H32	86.1807473
H13	68.223242	H33	87.2949443
H14	70.9279265	H34	91.1290837
H15	73.7930696	H35	92.767629
H16	64.9849206	H36	99.8715807
H17	65.0927366	H37	94.822947
H18	65.3067561	H38	96.2378961
H19	68.0813754	H39	97.5762979
H20	64.6770765	H40	98.3870794

## DESEMPEÑO DE LA BOMBA ACTUAL

Como se mencionó en el capítulo anterior, la empresa encargada de la instalación de la bomba proveyó la información referente a las curvas de operación de la bomba. En las siguientes Figuras (Fig. 5.4 y Fig. 5.5) se muestran las curvas de desempeño que tiene el equipo actualmente instalado.

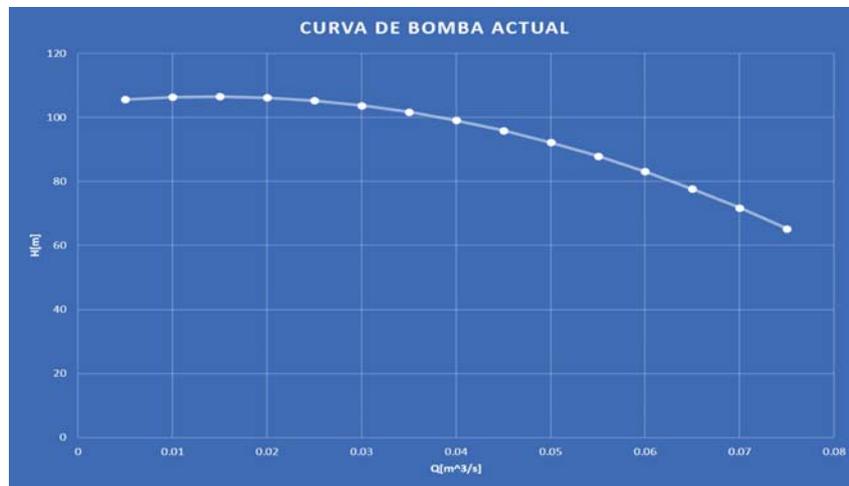
**Fig. 5.4** Curva de operación de la bomba actual



Fig. 5.5 Curva de eficiencia de la bomba actual

Empleando los resultados de los cálculos realizados en los apartados anteriores y utilizando la Ec.5.5 se pudieron realizar las distintas curvas que representan la carga que se ejerce en la bomba para cada una de las trayectorias (bomba-hidrante).

$$H = z + \left( f \frac{l}{d} + \sum k_m \right) \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (5.5)$$

En la Fig. 5.6 se muestra la comparativa de las curvas de desempeño y eficiencia de la bomba que se encuentra instalada actualmente, en conjunto con las distintas cargas a las que se somete el sistema (Hidrantes).

## 5.3

### EVALUACIÓN DEL CONSUMO ELÉCTRICO ACTUAL

A partir de la información obtenida mediante la recopilación de recibos eléctricos se presentan las siguientes observaciones, que se detallarán a continuación en las secciones posteriores.

#### 5.3.1

##### EVALUACIÓN CON BASE EN LA TARIFA

Debido a que en México existen diversas condiciones para el uso de la energía eléctrica, se emplea una segmentación de los costos a cubrir teniendo en cuenta la región, el uso y las características a suministrar para el uso de la electricidad.

En el caso de la aplicación sobre la que se realiza el presente estudio, se encuentra dentro de la tarifa **9N**, la cual es un caso especial dentro de la tarifa conocida como **RABT**.

La aplicación de la tarifa RABT se define a continuación *"Se aplicará exclusivamente a los servicios en baja tensión que destinen la energía para el bombeo de agua utilizada en el riego de tierras dedicadas al cultivo de productos agrícolas y al alumbrado del local donde se encuentre instalado el equipo de bombeo."* (Tarifa RABT, 2020)

A su vez, la aplicación de la tarifa 9N, se encuentra definida como *"Esta tarifa de estímulo nocturna se aplicará para la energía eléctrica utilizada en la operación de los equipos de bombeo y rebombeo de agua para riego agrícola por los sujetos productivos inscritos en el padrón de beneficiarios de energéticos agropecuarios, hasta por la Cuota Energética determinada por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. La inscripción a esta tarifa será a solicitud del usuario."* (Tarifa 9 Nocturna, 2020)

Como se puede ver en la Fig. 5.7 se muestra la información respectiva a los consumos realizados durante el periodos de estudio, los cuales se encuentran segmentados de acuerdo al periodo establecido en la tarifa 9N, estos se encuentran definidos por los siguientes horarios<sup>8</sup>:

- Periodo nocturno, se comprende de las 00:00:01 hasta 08:00:00 horas y será aplicable todos los días.
- Periodo diurno, se comprende de las 08:00:01 hasta 00:00:00 horas y será aplicable todos los días. (Tarifa 9 Nocturna, 2020)

<sup>8</sup>Se utilizarán los horarios oficiales establecidos localmente

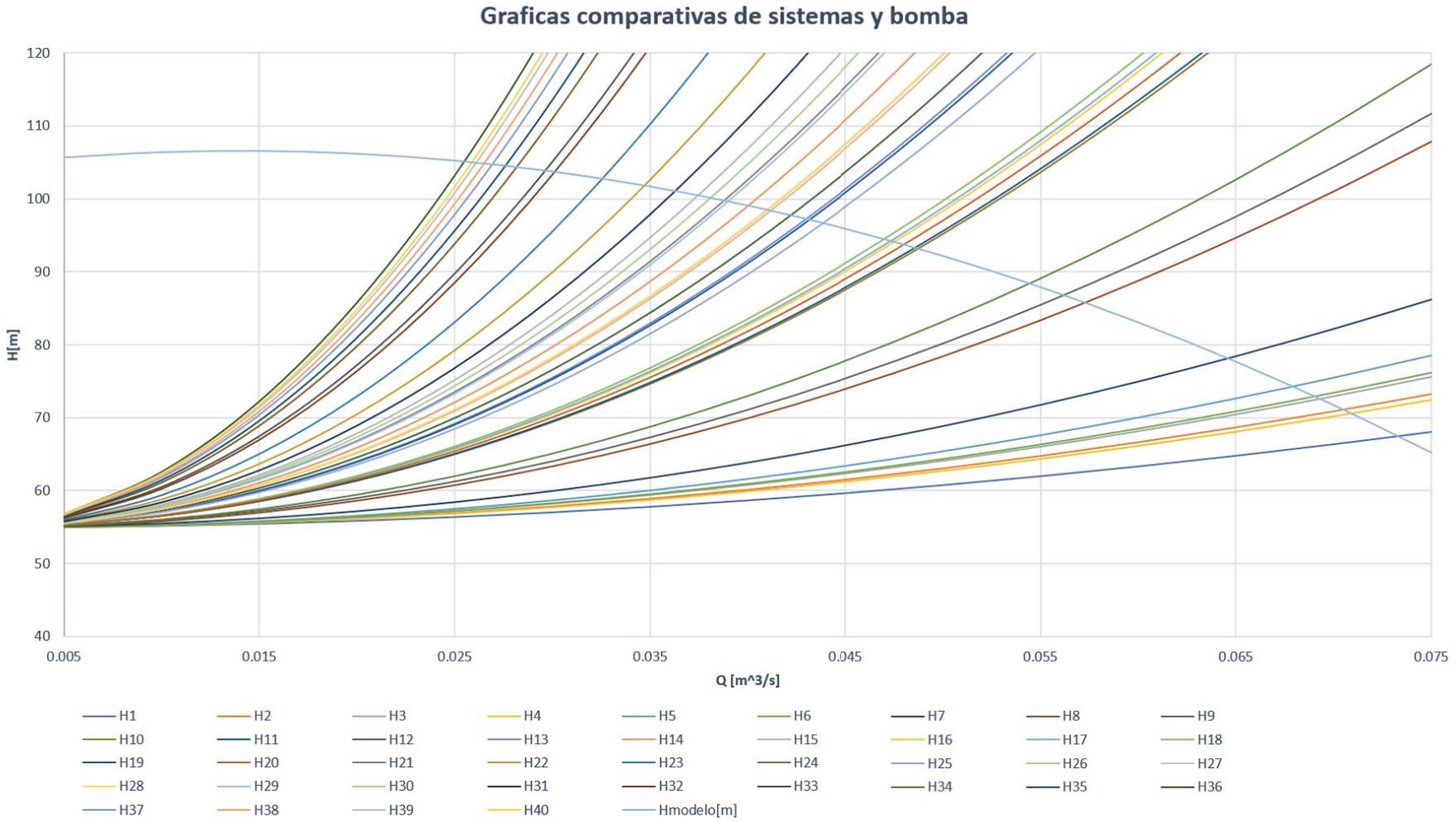


Fig. 5.6 Curvas representativas de los sistemas

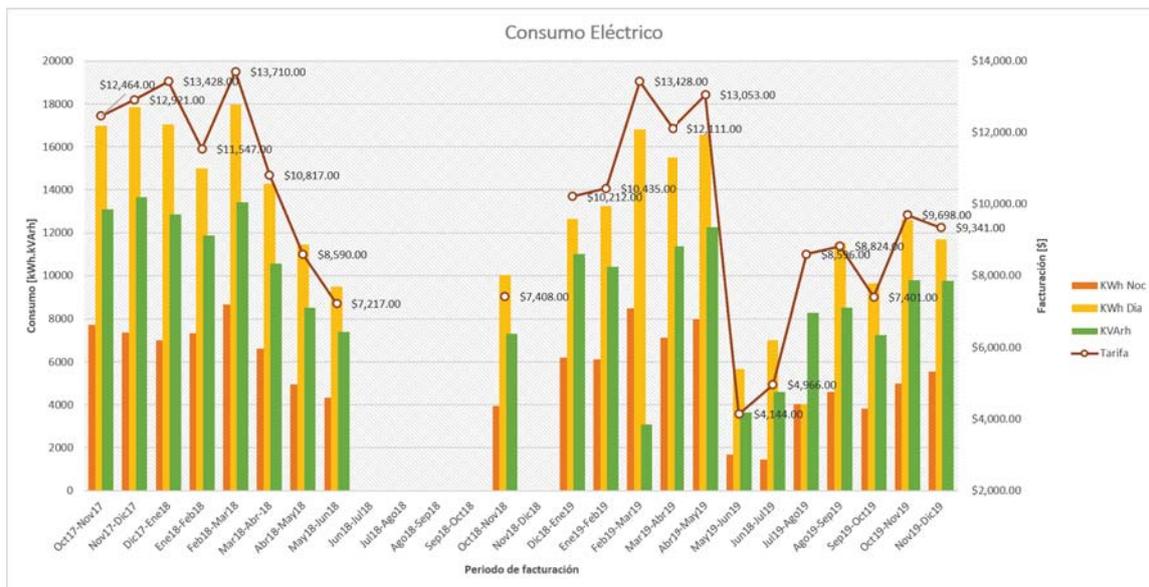


Fig. 5.7 Consumos energéticos con sus respectivos costos

Los cargos generados por el uso de la energía eléctrica se encuentran dentro de los alcances de la tarifa 9N<sup>9</sup>, cuyos beneficios son desaprovechados debido a que por parte de la Sociedad no se cuenta con una planificación que pudiera realizar una gestión del calendario de riego, aprovechando los costos reducidos que se presentan en un horario nocturno, lo cual se encuentra sustentado en el hecho de que a los usuarios del sistema de riego les incomoda realizar labores de riego durante la noche, por lo que se le da prioridad a agendar sus horarios de riego durante el día, lo cual se ve reflejado en la gráfica de consumos mostrada en la Fig. 5.7.

### 5.3.2

## CORRECCIÓN DE FACTOR DE POTENCIA

Gracias a los datos obtenidos durante la etapa de levantamiento y empleando el analizador de redes (Ver Sección 4.5), se pudo establecer que el factor de potencia promedio del motor de la bomba es de  $fp = 0.7839$ , así como que su demanda promedio es de  $P = 36.078$  [kW].

A su vez, en la Fig. 4.4 se presenta que actualmente se cuenta con un banco de capacitores de  $Q_C = 10$  kVAr y que de acuerdo a los datos que se muestran en la sección 4.4.6, podemos observar que se presenta un bajo factor de potencia lo que origina que se generen multas por esta condición.

Dado que en este caso la instalación eléctrica se encuentra dedicada exclusivamente al suministro de energía para la bomba, se plantea el caso de una compensación exclusivamente para el motor de la bomba, situación que simplifica el método para realizar el cálculo del banco de capacitores necesario para el motor, el cual se encuentra determinado por la siguiente ecuación:

$$Q_C = P \left( \frac{\sqrt{1 - fp_1^2}}{fp_1} - \frac{\sqrt{1 - fp_2^2}}{fp_2} \right) \quad (5.6)$$

Donde:

- $Q_C$  es el valor del banco de capacitores en [kVAr]
- $P$  es la potencia activa demandada por el sistema en [kW]
- $fp_1$  es el valor del factor de potencia actual.
- $fp_2$  es el valor del factor de potencia al que se quiere llegar.

De acuerdo con lo establecido por el Código de Red y los beneficios económicos (Ver Sección 6.3.2) que pueden obtenerse al aumentar el factor de potencia, se busca que este se encuentre entorno a 0.995. Por lo que la ecuación 5.6 queda de la siguiente manera:

<sup>9</sup>Durante los periodos de operación sobre los que se realizó el análisis, no se encuentra un exceso en el consumo con respecto a lo otorgado, que pudiera originar cargos contemplados en la tarifa RABT, desafortunadamente la cantidad otorgada para esta acometida se desconoce y no se cuenta con la documentación pertinente (contrato) que pudiera corroborar dicho dato.

$$Q_C = (36.078 [kW]) \left( \frac{\sqrt{1 - 0.7839^2}}{0.7839} - \frac{\sqrt{1 - 0.995^2}}{0.995} \right) = 24.94 [kVAr]$$

Dado que no existe un valor comercial que cumpla con las estimaciones calculadas, se presenta la evaluación de bancos de capacitores de 25 [kVAr] @ 440 [V] y el de 25 [kVAr] @ 480 [V] que son valores comerciales que se aproximan al requerimiento calculado. En el caso del segundo banco de capacitores propuesto es necesario realizar un ajuste debido a que el banco se encuentra diseñado para una operación a una tensión de operación distinta, el valor del banco de capacitores equivalente se calcula empleando la siguiente ecuación (Ec. 5.7):

$$Q_{eq} = Q_{nom} \left( \frac{V_L}{V_{nom}} \right)^2 \quad (5.7)$$

Donde:

- $Q_{eq}$  es el valor del banco de capacitores en las condiciones actuales de la red.
- $Q_{nom}$  es el valor nominal del banco de capacitores
- $V_L$  es el valor de tensión presente en la red en la que se instalará el banco de capacitores.
- $V_{nom}$  es el valor nominal de tensión de alimentación del banco de capacitores.

Por lo que se tiene que:<sup>10</sup>

$$Q_{eq} = 25[kVAr] \left( \frac{447[V]}{480[V]} \right)^2 = 21.68[kVAr]$$

Teniendo en cuenta las siguientes consideraciones, se evaluaron los resultados que se obtendrían con respecto a la instalación de cada uno de los bancos respectivamente, mediante el calculo del nuevo factor de potencia, mediante la siguiente ecuación (Ec. 5.8):

$$fp_N = \frac{P}{\sqrt{P^2 + (Q - Q_C)^2}} \quad (5.8)$$

Donde:

- $fp_N$  es el nuevo factor de potencia.
- $P$  es la potencia activa demandada actual.
- $Q$  es la potencia reactiva demandada actual.
- $Q_C$  es el valor del banco de capacitores propuesto.

En el caso del banco de capacitores de 25 [kVAr] @ 440 [V], se tiene que:

$$fp_N = 0.9952$$

En el caso del banco de capacitores de 25 [kVAr] @ 480 [V] (se emplea el valor 21.68 [kVAr]), se tiene que:

$$fp_N = 0.9824$$

<sup>10</sup>Para el cálculo del valor del capacitor equivalente se empleó el valor promedio de las mediciones que se obtuvieron durante el estudio (Ver. Sección 4.5)

# PRESENTACIÓN DE PROPUESTAS DE AHORRO Y USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA

En esta sección se presentan las propuestas que se generaron en función del análisis de los datos de operación, diseño y comportamiento del sistema de bombeo. Las propuestas se encuentran divididas en técnicas y operacionales.

## 6.1 PROPUESTAS TÉCNICAS

A continuación se hace mención de la metodología empleada para dimensionar una nueva bomba que pueda trabajar de manera conjunta con el equipo actualmente instalado, esto con el fin de que ambos equipos puedan operar en puntos donde pueda maximizarse su eficiencia, con el fin de generar un ahorro de la energía demandada para las tareas de riego.

### 6.1.1 INSTALACIÓN DE UN VARIADOR DE FRECUENCIA PARA LA BOMBA

A partir de los resultados obtenidos en la Sección 5.2.3, se presentan las curvas que representan la carga que se ejerce en la bomba para las trayectorias (bomba-hidrante) con condiciones críticas, las cuales se representan en la Fig. 6.1.

Los modelos para cada una de las curvas son:

$$H_{min} = 54.9[m] + \frac{15.3[m]}{6.53 \times 10^{-3} [m^3/s]} Q^2 \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (6.1a)$$

$$H_{max} = 54.9[m] + \frac{505.77[m]}{6.53 \times 10^{-3} [m^3/s]} Q^2 \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (6.1b)$$

Con la gráfica mostrada en la Fig. 6.1 se puede apreciar que existe un amplio rango en cuanto a los puntos de operación de la bomba. Por lo que el objetivo es proponer un sistema que logre ajustar las curvas de los sistemas dentro de la zona de máxima eficiencia de la bomba.

Mediante las "leyes de afinidad" semejanza (Ec. 6.2), las cuales son relaciones entre velocidad, presión de descarga y potencia de entrada en la bomba y permiten predecir el rendimiento de una bomba a una velocidad que no sea la característica. (Pérez Abril, Ali Dauod, Jara González, y De León Benítez, 2017)

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} = \alpha \quad (6.2a)$$

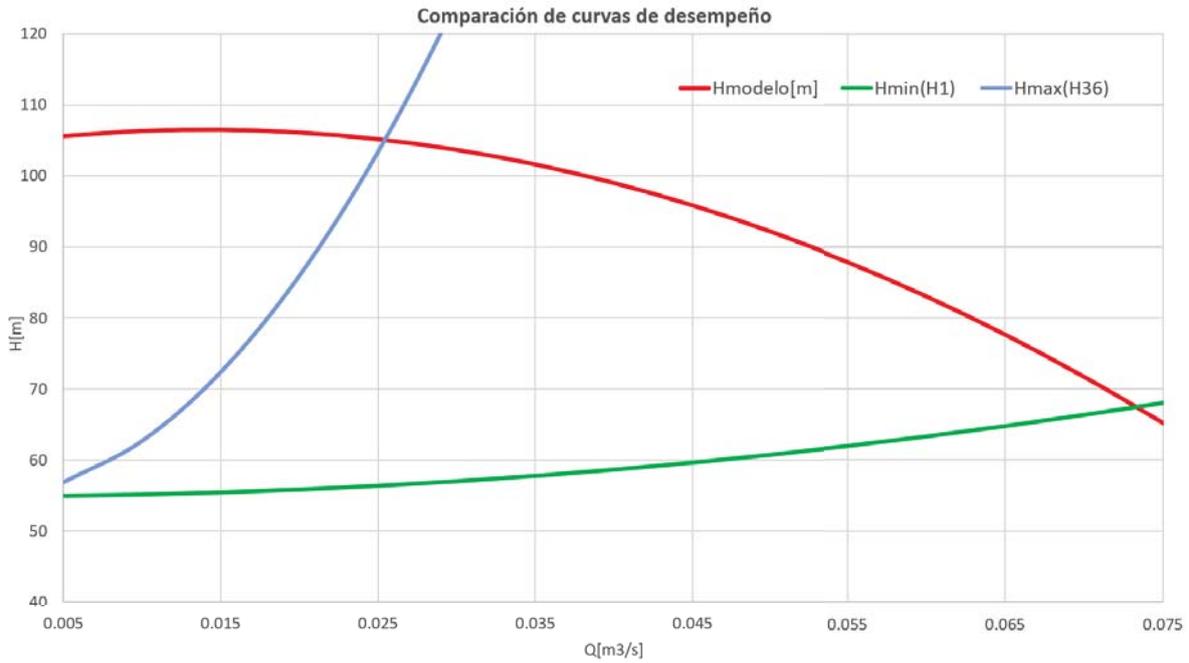


Fig. 6.1 Curvas representativas de los sistemas

$$\frac{H_1}{H_2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 = \alpha^2 \quad (6.2b)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^3 = \alpha^3 \quad (6.2c)$$

En donde:

- $Q_1$  es el flujo volumétrico en la condición inicial de operación.
- $Q_2$  es el flujo volumétrico en la nueva condición de operación.
- $N_1$  es la velocidad de la bomba en la condición inicial de operación.
- $N_2$  es la velocidad de la bomba en la nueva condición de operación.
- $H_1$  es la carga de la bomba en la condición inicial de operación.
- $H_2$  es la carga de la bomba en la nueva condición de operación.
- $P_1$  es la potencia de entrada de la bomba en la condición inicial de operación.
- $P_2$  es la potencia de entrada de la bomba en la nueva condición de operación.
- $\alpha$  se define como la condición de diseño.

El modelo que representa la relación H-Q de la bomba, se encuentra representado por una función cuadrática, ésta se muestra a continuación (Ec. 6.3):

$$H[m] = -11128 Q^2[m^3/s] + 312.38 Q[m^3/s] + 104.37 \quad (6.3)$$

Por lo que aplicando las leyes de afinidad, la Ec. 6.2b), se presenta el siguiente modelo, el cual se pretende afectar con las variaciones de velocidad que se implementarán mediante el variador de frecuencia.

$$H_X = \frac{-11128 Q^2[m^3/s] + 312.38 Q[m^3/s] + 104.37}{\alpha^2} \quad (6.4)$$

En donde:  $H_X$  represente el comportamiento de bomba para el nuevo punto de operación con la variación de velocidad y  $\alpha$  la variable de diseño (en este caso la relación entre las variaciones de velocidad).

De la misma manera, existe un modelo matemático que representa la eficiencia de la bomba en función de su punto de operación, éste se muestra en la Ec. 6.5.

$$\eta = 33544.82 Q^2 [m^3/s] + 3210.01 Q [m^3/s] \quad (6.5)$$

Aplicando la Ec. 6.2a tenemos el siguiente modelo empleando la variable de diseño  $\eta$ :

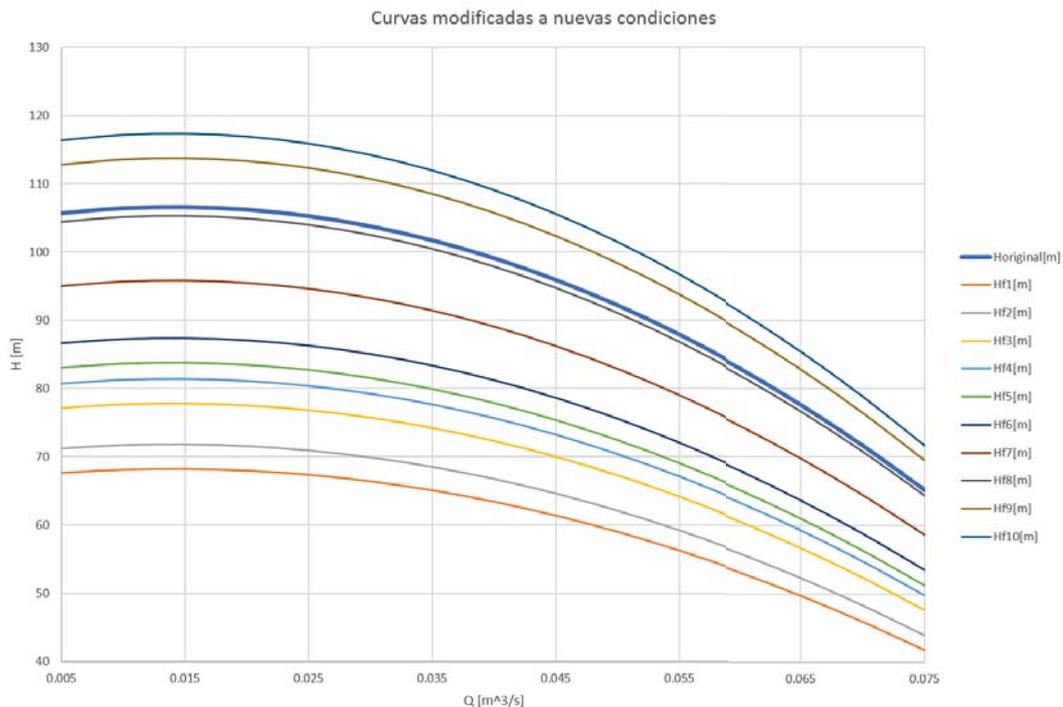
$$\eta_X = \frac{33544.82}{\alpha^2} Q^2 [m^3/s] + \frac{3210.01}{\alpha} Q [m^3/s] \quad (6.6)$$

Para facilitar la operación del sistema de bombeo, se seleccionaron diez nuevos puntos de operación para ajustar la velocidad de giro de la bomba. Empleando la Ec. 6.2b se calculó la frecuencia a la que se debe alimentar el sistema. En la Tabla 6.1 se muestran éstos resultados.<sup>1</sup>

**Tabla 6.1** Nuevas condiciones de operación

Hx	Vel [rpm]	f [Hz]
57	2800.98297	46.6830496
60	2873.7479	47.8957983
65	2991.09164	49.8515274
68	3059.33826	50.9889709
70	3104.00249	51.7333748
73	3169.81905	52.8303175
80	3318.31824	55.305304
88	3480.28153	58.0046922
95	3616.05347	60.2675578
98	3672.70528	61.2117546

Empleando los valores de la Tabla 6.1 se construyó las nuevas curvas de desempeño para las representaciones del modelo de acuerdo a las nuevas velocidades de operación. En la Fig. 6.2 se pueden apreciar éstos cambios.



**Fig. 6.2** Curvas representativas de los sistemas

Posteriormente evaluamos la salida de las nuevas curvas de operación en cada uno de los puntos de operación del sistema de riego y nuevamente empleando las leyes de afinidad, se conforma la Tabla 6.2.

<sup>1</sup>De acuerdo con el fabricante el motor es tipo jaula de ardilla, cuenta con un par de polos y las curva de fabrica se realizó a una velocidad de 3500 [rpm]

**Tabla 6.2** Características de puntos de operación bajo nuevas condiciones

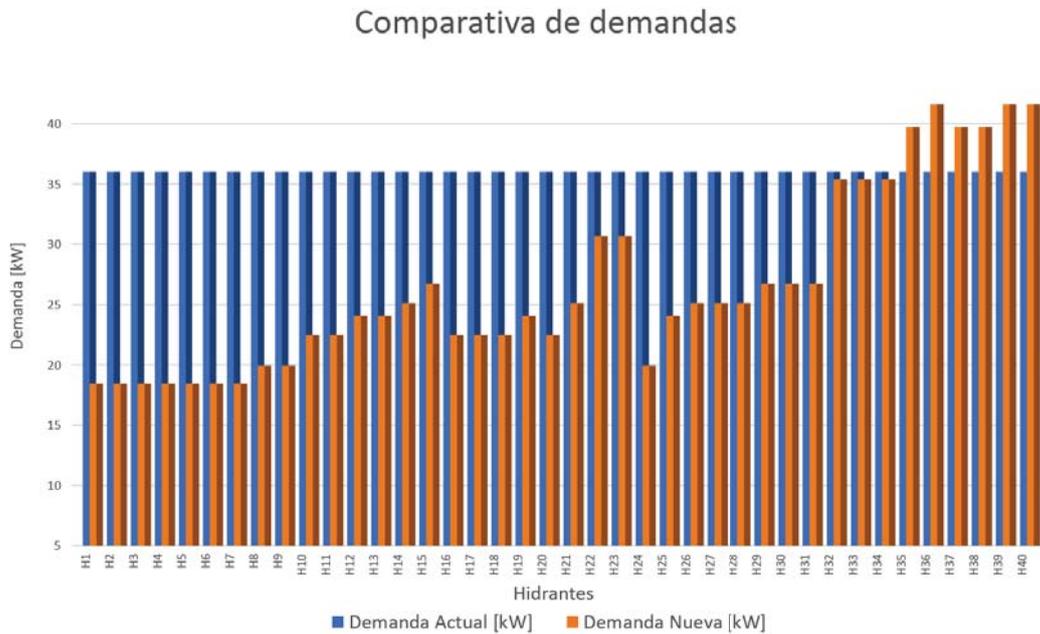
Hidrante	H [m]	N [rpm]	Q [ $m^3/s$ ]	$\eta$	Hidrante	H [m]	N [rpm]	Q [ $m^3/s$ ]	$\eta$
H1	56.26	2801	0.05505	0.76312	H21	72.22	3104	0.05041	0.76463
H2	56.79	2801	0.05408	0.76094	H22	77.53	3318	0.05691	0.75543
H3	57.04	2801	0.05363	0.75979	H23	81.16	3318	0.05219	0.76704
H4	56.71	2801	0.05423	0.76129	H24	61.46	2874	0.05117	0.75652
H5	57.34	2801	0.05308	0.75827	H25	67.53	3059	0.05443	0.76791
H6	57.09	2801	0.05353	0.75952	H26	69.80	3104	0.05400	0.76794
H7	58.13	2801	0.05164	0.75370	H27	69.96	3104	0.05376	0.76793
H8	60.37	2874	0.05306	0.76179	H28	69.99	3104	0.05371	0.76793
H9	60.76	2874	0.05238	0.76008	H29	72.00	3170	0.05513	0.76649
H10	64.25	2991	0.05490	0.76765	H30	73.01	3170	0.05369	0.76774
H11	64.35	2991	0.05475	0.76756	H31	75.28	3170	0.05045	0.76638
H12	68.87	3059	0.05238	0.76651	H32	86.18	3480	0.05585	0.74810
H13	68.22	3059	0.05336	0.76745	H33	87.29	3480	0.05453	0.75428
H14	70.93	3104	0.05232	0.76724	H34	91.13	3480	0.05001	0.76676
H15	73.79	3170	0.05257	0.76792	H35	92.77	3616	0.05614	0.73331
H16	64.98	2991	0.05373	0.76669	H36	99.87	3673	0.05172	0.75411
H17	65.09	2991	0.05355	0.76649	H37	94.82	3616	0.05390	0.74734
H18	65.31	2991	0.05321	0.76605	H38	96.24	3616	0.05235	0.75489
H19	68.08	3059	0.05358	0.76759	H39	97.58	3673	0.05415	0.74091
H20	64.68	2991	0.05422	0.76717	H40	98.39	3673	0.05329	0.74607

Con estos resultados, podemos estimar los nuevos valores de demanda para la bomba en estos puntos de operación, éstos se presentan en la Tabla 6.3 y se pueden visualizar de manera gráfico de la Fig. 6.3.

**Tabla 6.3** Comparativa de consumos actuales y propuestos

Hidrante	$D_{Actual}$ [kW]	$D_{Nueva}$ [kW]	Hidrante	$D_{Actual}$ [kW]	$D_{Nueva}$ [kW]
H1	36	18.45142	H21	36	25.11103
H2	36	18.45142	H22	36	30.6798
H3	36	18.45142	H23	36	30.6798
H4	36	18.45142	H24	36	19.92711
H5	36	18.45142	H25	36	24.04257
H6	36	18.45142	H26	36	25.11103
H7	36	18.45142	H27	36	25.11103
H8	36	19.92711	H28	36	25.11103
H9	36	19.92711	H29	36	26.74249
H10	36	22.4692	H30	36	26.74249
H11	36	22.4692	H31	36	26.74249
H12	36	24.04257	H32	36	35.39497
H13	36	24.04257	H33	36	35.39497
H14	36	25.11103	H34	36	35.39497
H15	36	26.74249	H35	36	39.70113
H16	36	22.4692	H36	36	41.59648
H17	36	22.4692	H37	36	39.70113
H18	36	22.4692	H38	36	39.70113
H19	36	24.04257	H39	36	41.59648
H20	36	22.4692	H40	36	41.59648

De los resultados mostrados (Tabla 6.3), se puede ver que en el caso de los últimos hidrantes se presenta un consumo mayor de energía, esto es debido a que se aumentó la velocidad del motor con el fin de incrementar el caudal entregado y poder reducir las horas de operación de la bomba.



**Fig. 6.3** Grafica comparativa de consumo

El agregar un equipo con las características requeridas anteriormente afectaría al consumo energético de la siguiente manera. Para realizar el análisis que se presenta a continuación se tomó en cuenta las siguientes consideraciones:

- De acuerdo con la información mostrada en la Sec. 4.4.6 sabemos que el consumo promedio mensual es  $Consumo_{prom} \approx 18429.9$  [kWh]
- El promedio de energía mensual empleada por hectárea de cultivo es  $E_{promedio/ha} = 415.13$  [kWh/ha], el cual se estima empleando la relación de la energía empleada en relación a la superficie regada.
- Se calcularon las horas de riego promedio empleadas mensualmente durante el año 2019, las cuales son:  $h_{promedio\ riego} = 419.9$  [h].

Con las consideraciones mencionadas anteriormente se obtuvieron los siguientes valores para realizar la evaluación del nuevo sistema:

- Se emplearon los datos de la Tabla 6.2 y Tabla 6.3, para estimar las nuevas horas de riego que se estiman para satisfacer las recomendaciones presentadas en la Tabla 5.3.
- Se realizó el producto de la demanda de cada uno de los hidrantes por las nuevas horas de riego para estimar el consumo mensual implementando el variador de frecuencia.

Los resultados son los siguientes:

- **Consumo actual promedio** = 18,429.90 [kWh]
- **Consumo promedio de la propuesta** = 13,026.01 [kWh]
- **Posible ahorro energético** = 5,403.89 [kWh]

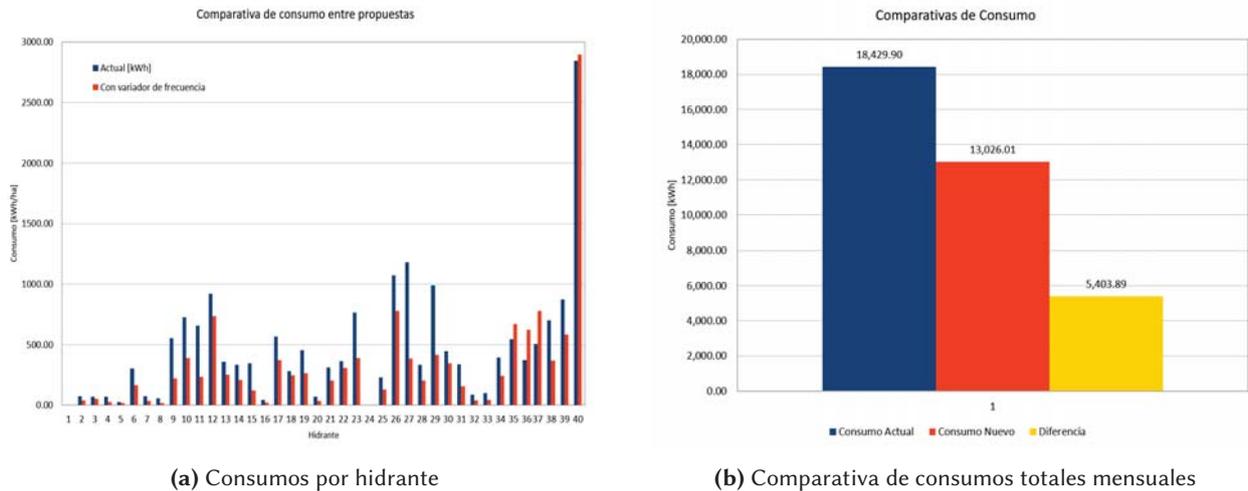


Fig. 6.4 Gráficas de consumo entre sistema actual y la nueva propuesta

En la Sección 6.3.1 se realiza el análisis de viabilidad económica de la implementación de un sistema de control para la operación de la bomba.

## 6.2 PROPUESTAS OPERACIONALES

Adicional a las propuesta mencionada anteriormente, existen otros tipos de propuestas que no requieren realizar una inversión, las cuales hacen referencia a un cambio en la manera de operar el sistema con el fin de poder tener un mejor aprovechamiento. En este caso se hace mención de una propuesta que aunque no están directamente relacionadas a un uso eficiente de la energía representan oportunidades de generar beneficios económicos en la facturación eléctrica del sistema de bombeo.

### 6.2.1

#### APROVECHAMIENTO DE BENEFICIOS POR TARIFA ELÉCTRICA

Como se mencionó en la Sección 5.3.1 se presentó que la tarifa en la que se encuentra realizado el contrato de suministro al sistema de bombeo se encuentra dentro de la tarifa 9N, la cual invita a realizar el consumo de la energía preferentemente en un horario nocturno.

Aunque se llevan a cabo labores de riego durante el periodo nocturno, estas se realizan principalmente por el turno que se toma en el calendario de riego y no por realizar un aprovechamiento de los beneficios que se ofrecen.

Tomando en cuenta la información presentada en la Sección 4.4.6, en la siguientes gráficas (Fig.6.5) se presentan los consumos segmentados por periodo en el año 2019.

De acuerdo con lo anterior, se propone emplear al máximo los beneficios otorgados por la tarifa al emplear las 240 [h] disponibles al mes, con el fin de reducir en lo posible el consumo durante el horario de mayor coste. Como es posible apreciar, durante algunos periodos de riego, el consumo mensual puede ser cubierto durante el periodo nocturno lo cual generaría un ahorro significativo en la facturación eléctrica. En la Sección 6.3.3 se muestra cuales serían los beneficios al implementar dicha estrategia.

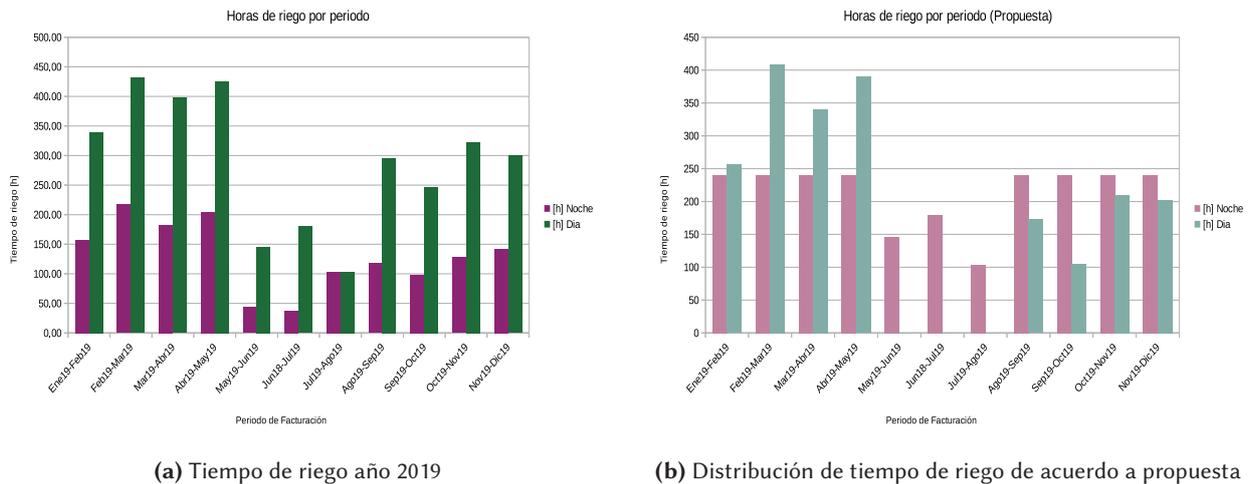


Fig. 6.5 Gráficas de tiempo de uso del sistema de bombeo

## 6.3

### VIABILIDAD ECONÓMICA DE LAS PROPUESTAS

Uno de los criterios importantes, si no el más se encuentra en los beneficios económicos que pudieran obtenerse al efectuar las propuestas, antes mencionadas. Por lo que a continuación, se hace el análisis de viabilidad económica que puede obtenerse al efectuar las propuestas antes descritas.

#### 6.3.1

#### INSTALACIÓN DE UN VARIADOR DE FRECUENCIA PARA LA BOMBA

Como se mencionó anteriormente la propuesta técnica que se sugiere, es la instalación de un variador de frecuencia cuya función sea la de operar en los distintos puntos de operación del sistema de bombeo.

Para el análisis económico se tomaron en cuenta los siguientes costos:

- El costo promedio de un variador de frecuencia de 460 [V] y 60 [hp] es de \$52,000 MXN.
- El costo estimado de la mano de obra y suministros para la instalación de un sistema de control es de \$47,000 MXN.<sup>2</sup>

Ante el ahorro energético generado que podría obtenerse que es de aproximadamente **5403.89 [kWh]** a un costo aproximado de  $\$0.6200$  [kWh]<sup>3</sup> lo que representa un ahorro mensual de **\$ 3,350.41 MXN**.

De tal manera que el Tiempo de Retorno de Inversión para la adquisición e instalación del nuevo equipo de bombeo, se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Tiempo de Retorno de Inversión} = \frac{\text{Costo adecuación sistema}}{\text{Beneficios obtenidos}} = \frac{\$99,000}{\$3,350.41} = \mathbf{29.54 \text{ meses}}$$

El tiempo de vida aproximado de un variador de frecuencia es de aproximadamente veinte años (*¿Cómo prolongar la vida útil de un variador de frecuencia?*, 2021), con posibilidad de aumentar el tiempo a quince años con la realización de trabajos de mantenimiento adecuados.

Una método para podernos ayudar a analizar la viabilidad de esta inversión adicional, al tiempo de retorno es el Valor Presente Neto, el cual se cálculo teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se plantea una caída en la eficiencia de la bomba de 2% anual.

<sup>2</sup>Se consideran los siguientes elementos como parte adicionales del sistema de control:

- Controlador PLC con tarjeta analógica de salida y conexión Ethernet
- Pantalla táctil 9"
- Fuente de alimentación 24 [VDC]
- Integración y configuración del sistema de control

<sup>3</sup>Costo por [kWh] de acuerdo a tarifa 9CU en el año 2019

- Se considera un tiempo de vida de la bomba actual de ocho años más.
- Se tendrá un incremento en el costo del [kWh] correspondiente a \$0.02 MXN anual.
- No se aplicará ninguna labor de mantenimiento preventivo durante su tiempo de vida.<sup>4</sup>
- Se considera una inflación anual del 2.83 %<sup>5</sup>

$$VPN = -99,000 + \frac{40,205.0}{1.0283} + \frac{40,671.9}{1.0283^2} + \frac{41,086.9}{1.0283^3} + \frac{41,450.1}{1.0283^4} + \frac{41,761.0}{1.0283^5} + \frac{42,020.7}{1.0283^6} + \frac{42,228.2}{1.0283^7} + \frac{42,383.9}{1.0283^8} \quad (6.7)$$

$$VPN = 141,924.44$$

Lo cual representa que el costo de la inversión es amortizado durante el periodo de vida restante de la bomba, adicionalmente que se genera un ahorro de \$141,924.44 MXN.

### 6.3.2

## BONIFICACIÓN POR CORRECCIÓN DE FACTOR DE POTENCIA

Uno de los beneficios que se obtiene al operar una instalación eléctrica con un adecuado factor de potencia, se encuentra en el evitar cargos<sup>6</sup> por incumplir lo establecido por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) (*Tarifas-Disposiciones Complementarias*, 2020) y que a su vez otorga una bonificación por operar en un valor adecuado de factor de potencia. La CFE provee las siguientes fórmulas para calcular los recargos o bonificaciones según sea el caso:

$$\text{Porcentaje de recargo} = \frac{3}{5} \left( \frac{90}{fp} - 1 \right) * 100 \quad (6.8)$$

$$\text{Porcentaje de bonificación} = \frac{1}{4} \left( 1 - \frac{90}{fp} \right) * 100 \quad (6.9)$$

En donde el factor de potencia se presenta en porcentaje.

A partir de los datos recopilados referentes al consumo eléctrico, podemos realizar una estimación sobre la viabilidad económica respecto a la sustitución del banco de capacitores actuales con el calculado en la sección anterior, por lo que se presenta la siguiente estimación:

- El costo promedio de un banco de capacitores de 45 [kVAr] @ 480 [V]<sup>7</sup> es de \$6200 MXN.
- De acuerdo a la información presentada en la sección 4.4.6 se realiza una estimación del cargo promedio mensual referente a las multas generadas por un bajo factor de potencia el cual asciende a un valor promedio de \$101.13 MXN.
- El monto promedio de bonificación que se espera obtener con el factor de potencia propuesto (98.24 %) es del 2.1 %, el cual al tomar en cuenta el costo de la demanda promedio, generaría una bonificación promedio de \$210.31 MXN.

De tal manera que el Tiempo de Retorno de Inversión, se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Tiempo de Retorno de Inversión} = \frac{\text{Costo Banco de Capacitores}}{\text{Beneficios obtenidos}} = \frac{6200}{101.13 + 210.31} = \mathbf{19.91 \text{ meses}}$$

En promedio, los bancos de capacitores tienen un tiempo de vida aproximado de 100,000 horas (aproximadamente 148 meses), lo que origina que al realizar la presente inversión, los ahorros que podrían generarse son de \$46,345.00 MXN.

<sup>4</sup>El motivo de plantear esta situación es equiparar las condiciones que presenta la bomba actual

<sup>5</sup>Valor de la inflación anual calculada por el INEGI durante al año 2019

<sup>6</sup>Los cargos se generan al contar con un  $fp > 0.9$

<sup>7</sup>Se emplea este valor como referencia derivado de que en los catálogos aparece más comúnmente este nivel de tensión en comparación al de 440[V]

## 6.3.3

**APROVECHAMIENTO DE TARIFA NOCTURNA**

De acuerdo con la propuesta referente al aprovechamiento tarifario definido anteriormente, se presenta la siguiente tabla que muestra los beneficios posibles a obtener teniendo como referencia los consumos realizados durante el año 2019. Como dato adicional, se tiene el costo por [kWh] aplicables durante ese año, los cuales fueron:

- Periodo nocturno \$0.3100 por cada [kWh]
- Periodo diurno \$0.6200 por cada [kWh]

Periodo	Normal [h] Noche	Normal [h] Dia	Propuesta [h] Noche	Propuesta [h] Dia	Normal \$ Noche	Normal \$ Dia	Propuesta \$ Noche	Propuesta \$ Dia	Ahorro [\$]	Ahorro [%]
Ene19-Feb19	156.92	339.23	240	256.15	\$ 1 897.20	\$ 8 202.60	\$ 2 901.60	\$ 6 193.80	1004.40	9.94 %
Feb19-Mar19	217.41	431.38	240	408.79	\$2 628.49	\$10 430.88	\$2 901.60	\$9 884.66	273.11	2.09 %
Mar19-Abr19	182.67	397.77	240	340.44	\$2 208.44	\$9 618.06	\$2 901.60	\$8 231.74	693.16	5.86 %
Abr19-May19	204.74	425.31	240	390.05	?? 2 475.35	\$10 283.94	\$2 901.60	\$9 431.44	426.25	3.34 %
May19-Jun19	43.33	145.82	145.82	0.00	\$523.90	\$3 525.94	\$1 762.96	\$0	2286.88	56.47 %
Jun18-Jul19	37.21	180.00	180	0.00	\$449.81	\$4 352.40	\$2 176.20	\$0	2626.01	54.68 %
Jul19-Ago19	103.69	103.69	103.69	0.00	\$1 253.64	\$2 507.28	\$1 253.61	\$0	2507.31	66.67 %
Ago19-Sep19	117.72	295.21	240	172.92	\$1 423.21	\$7 138.06	\$2 901.60	\$4 181.28	1478.39	17.27 %
Sep19-Oct19	97.95	246.95	240	104.90	\$1 184.20	\$5 971.22	\$2 901.60	\$2 536.42	1717.40	24.00 %
Oct19-Nov19	127.97	322.28	240	210.26	\$1 547.21	\$7 792.78	\$2 901.60	\$5 084.00	1354.39	14.50 %
Nov19-Dic19	142.44	300.08	240	202.51	\$1 722.05	\$7 255.86	?? 2 901.60	\$4 896.76	1179.55	13.14 %

**Tabla 6.4** Beneficios mensuales obtenidos por ajuste al horario de riego

En la tabla anterior se puede ver que existe un ahorro en la facturación eléctrica, al aplicar el cambio de horario aprovechando los incentivos que presenta la tarifa nocturna, los que de acuerdo a lo facturado en el año 2019 se pudo haber generado un ahorro de \$15,546.84 MXN lo que representa un 16.4 % de a facturación anual total.

La intención de realizar este proyecto surge por el interés de apoyar a los agricultores del municipio de Santa Clara Huitziltepec, Puebla en la reducción de los gastos que se presentan durante la ejecución de sus actividades que les proveen su sustento; por lo que el tratar de volver más eficiente el proceso de riego tanto hidráulica como energéticamente hablando, lograría disminuir los costos asociados a las tareas de siembra.

De los objetivos planteados para la ejecución del proyecto, se puede decir lo siguiente:

- El sistema de bombeo actual, aunque está operativo y cumpliendo con sus cometidos, se encuentra trabajando a una baja eficiencia debido a la gran variedad de descargas que se presentan a lo largo de la red de distribución.
- Los costos que se tienen actualmente por la operación del sistema de bombeo son relativamente bajos en comparación con otras aplicaciones no agrícolas, debido a los apoyos gubernamentales provistos por la segmentación de las tarifas eléctricas.
- La integración de un variador de frecuencia a la operación del sistema de bombeo puede generar ahorros significativos de aproximadamente 5,500 [kWh] mensuales, lo cual representa una disminución de consumo anual cercano al 30 %.
- Reemplazar el banco de capacitores actualmente instalado por uno de 10 [kVAr] lograría eliminar los cargos por bajo factor de potencia e incluso podría lograr una bonificación que tornaría la inversión costeable mediante los ahorros en un periodo de 30 meses.
- Aprovechar los beneficios definidos por la segmentación horaria de la tarifa eléctrica 9N, podría reducir en un 16 % el costo anual del suministro eléctrico.

Como resultados de los trabajos de análisis de los datos obtenidos, se elaboraron los siguientes productos:

- Se elaboró un plano de la actual red de riego de la comunidad de Santa Clara Huitziltepec, Puebla.
- Se elaboró el diagrama unifilar del sistema de alimentación de la bomba.
- Se realizó una presentación ante los miembros del comité sobre las condiciones actuales en las que se encuentra su sistema de bombeo y las oportunidades de mejora que se pueden implementar, en la que se mencionó lo siguiente:
  - Aprovechar los beneficios económicos de regar durante un periodo nocturno.
  - Realizar trabajos de mantenimiento en la red de bombeo.
  - Realizar el remplazo del banco de capacitores actualmente instalado por uno que realmente pudiera evitar sanciones económicas.

# ANEXOS

# MÉTODOS DE RIEGO

En este anexo se hace mención de las principales características de los sistemas de riego, así como una comparativa de estos.

- La **topografía** del terreno y la **forma** de la parcela (pendiente, longitud y anchura).
- Las **características físicas del suelo**, particularmente las relativas a su capacidad para almacenar el agua.
- **Tipo de cultivo**, se requiere conocer sus requerimientos de agua para obtener las capacidades máximas.
- La **disponibilidad de agua**, es importante determinar la cantidad de recurso disponible.
- La **calidad del agua de riego**, provee información para determinar los métodos de riego, así como algunos componentes de la instalación.
- El **coste de la instalación** de cada sistema en particular, tanto la inversión inicial como en la ejecución de los riegos y los mantenimientos.(Gómez, 2010a)

En la actualidad, son tres los tipos de riego más utilizados, los cuales se describen a continuación.

## A.1 RIEGO POR SUPERFICIE

El riego por superficie es el método más usado en los sistemas de riego debido a su facilidad de implementación, ya que se puede aplicar prácticamente a cualquier tipo de cultivo.

Siguiendo este método, la aplicación de agua a la parcela implica una serie de fases o etapas (Fig. A.1), las cuales hacen referencia al movimiento del agua, su almacenamiento sobre la superficie del suelo y su infiltración. Un desarrollo habitual de un sistema de riego por superficie consiste en lo siguiente:

1. **Avance del agua sobre la superficie:** Se origina desde el momento en que el agua empieza a ser aplicada en la parcela hasta que alcanza el punto más lejano, se considera que esta etapa finaliza cuando todos los puntos a los que debe llegar el agua se encuentran mojados.
2. **Almacenamiento:** Se encuentra posterior a la etapa de avance y se considera que esta termina hasta que se corta el suministro de agua, es decir hasta que se alcanza el tiempo de aplicación del riego, denominado **tiempo de riego**.
3. **Agotamiento:** Cuando se corta el suministro de agua, inicial el fenómeno de infiltración (y escurrimiento en caso de que se tenga pendiente), lo cual hace que que el agua almacenada vaya desapareciendo.
4. **Receso:** Al desaparecer el agua sobre la superficie, solo permanece la humedad, la etapa de receso termina hasta que se termine la humedad del suelo, si la parcela no tiene pendiente esta etapa se produce simultáneamente en todos los puntos.

Dentro de las versiones de esta técnica de riego se encuentran:

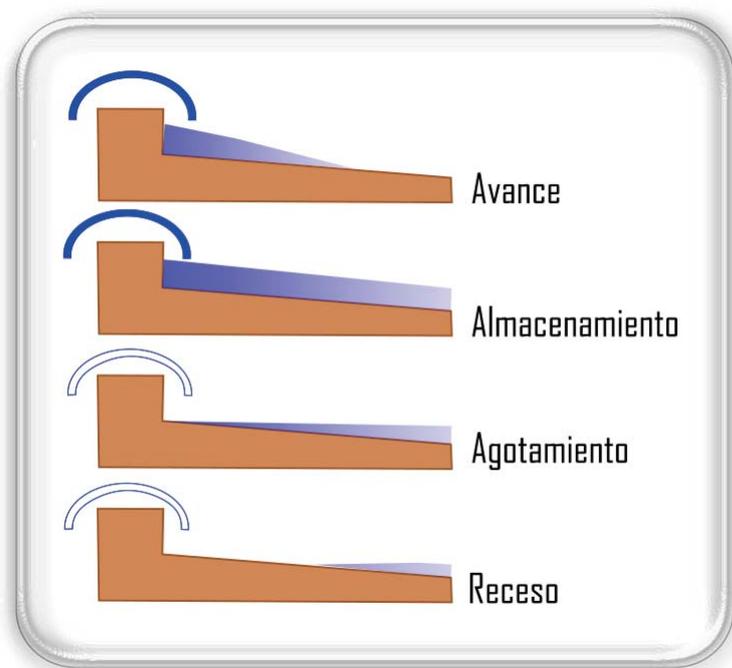


Fig. A.1 Etapas riego por superficie

- **Tablares:** Cuando se aplica este método, la parcela se divide en secciones cerradas separadas por medio de diques de unos 50 [cm] de altura, estas zonas son las denominadas como **tablares** o **canteros**, en su interior se vierte agua, la cual se queda estancada y se va infiltrando en el suelo.
- **Fajas:** En este tipo de riego, el terreno se segmenta en franjas rectangulares estrechas, llamadas **fajas** o **mel-gas**, separadas entre si mediante caballones dispuestos longitudinalmente. Es común que existan acequias de abastecimiento en el extremo superior de las fajas y canales de desagüe en el lado contrario
- **Surcos:** Dentro de este método se encuentran dos variantes, con pendiente y nivelados.
  - **Surcos con pendiente:** Esta opción contempla la distribución del riego mediante **surcos paralelos**, de forma que se infiltre por el fondo y por los costados de estos. La separación entre los surcos debe de ser tal que se asegure el mojado de las raíces.
  - **Surcos nivelados:** En esta variante, el trazado de los surcos, se realiza dentro de un tablar. Por lo que esta modalidad, contempla las ventajas de ambas versiones. Con esta práctica se evitan encharcamientos localizados y se puede conseguir una buena uniformidad en la distribución del agua infiltrada, siempre que la parcela haya sido nivelada adecuadamente.

## A.2

### RIEGO POR ASPERSIÓN

Este es un método mediante el cual se busca simular el fenómeno de la lluvia, utilizando una red de riego a una presión adecuada hasta los dispositivos encargados de distribuirla, conocidos como aspersores. Una de las principales características de un sistema de riego por aspersión es que no debe de presentar escorrentía, y el tamaño de las gotas debe ser tal que no produzca erosión.

Para poder tener un mejor control sobre el sistema, generalmente se suele dividir el área de la parcela en una o varias **unidades de riego**.

En el caso de este tipo de sistemas, sus elementos se pueden seccionar en:

- **Red principal** o de **alimentación**, la cual se encarga de distribuir el agua en la parcela.
- **Ramales de aspersión**, que se derivan de la red principal y conducen el agua hasta los aspersores.

Una de las prácticas comunes en el riego por aspersión, es que los ramales sean móviles y puedan tomar agua de distintos puntos a lo largo de la tubería de alimentación. Cuando esto se implementa, la unidad de riego corresponde a la superficie asociada de cada ramal y a la operación de riego se le conoce como **postura**.

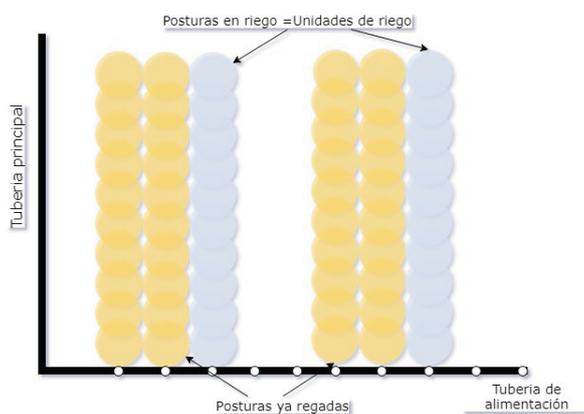


Fig. A.2 Esquema general de un sistema de riego por aspersión

Dependiendo de la movilidad de las tuberías, los sistemas de riego se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **Fijo:** Las tuberías abarcan la totalidad de la superficie que se vaya a regar, a su vez estos se subdividen en:
  - Temporal: Las tuberías se colocan sobre la superficie del suelo después de la siembra o plantación y se suelen quitar antes de la recolección.
  - Permanente: Las tuberías se encuentran permanentemente enterradas y solo están sobre el suelo los tubos porta-aspersores.
- **Móvil:** Las tuberías de la red de distribución, se van trasladando a medida de que se va regando. Este sistema está especialmente indicado cuando el suministro del agua es por medio de canales o acequias.
- **Mixta:** La red principal suele ser fija, estando las tuberías enterradas o sobre el suelo, mientras que los ramales de aspersión se van trasladando de una postura de riego a otra.

A su vez, existe otra clasificación que se aplica para los sistemas de desplazamiento continuo, en esta clasificación la red principal suele ser fija, estando las tuberías enterradas o sobre el suelo, mientras que los ramales de aspersión se van trasladando de una postura de riego a otra.

- **Pivotes o Pívots:** (Fig. A.3) Son equipos de riego autopropulsados que están constituidos fundamentalmente por una estructura metálica (ala de riego) que soporta la tubería con los emisores.



Fig. A.3 Sistema de riego con Pivotes  
(Pívots, 2019)

- **Laterales de avance frontal:** Consiste en un ala de riego que se desplaza frontalmente regando superficies de forma rectangular. Uno de los extremos del ala sirve de captación de agua y energía eléctrica, es autopropulsado y provoca el avance del ala de riego. Este sistema es más conocido como rangerz su estructura es semejante a la del sistema "pívo".
- **Cañones de riego:** (Fig. A.4) Utiliza aspersores de impacto de gran tamaño, denominados cañones"que trabajan a altas presiones y mojan grandes superficies de terreno. Van instalados sobre un carro o patín adaptable a distintas anchuras y alturas, según lo requiera el cultivo, y conectado al suministro de agua mediante una manguera. El equipo siempre riega hacia atrás con respecto al sentido de avance, consiguiéndose de esta manera que se desplace sobre suelo seco. (Gómez, 2010c)



Fig. A.4 Sistema de riego con Cañón  
(?, ?)

## A.3 RIEGO LOCALIZADO

Un sistema de riego localizado consta principalmente de tres tipos de componentes:

- **El cabezal de riego**, el cual se encarga de realizar las funciones de: filtrar, tratar, medir y suministrar el agua necesaria a la red de distribución.
- **La red de distribución** de agua, que incluye el sistema de tuberías que llevan el agua desde el cabezal hasta la parcela. En el caso del riego localizado, las tuberías suelen ser de PVC (Policloruro de vinilo) y PE (Polietileno). Las tuberías principales, las terciarias y en algunos casos las secundarias se instalan en polietileno, mientras que la tubería principal puede ser de PE o PVC.
- **Los emisores**, son los elementos que producen y controlan las salidas de agua, se busca que esta salida se produzca de manera discreta a lo largo de la lateral de riego formando "bulbos húmedos." en su defecto se puede aplicar de forma continua creándose una banda humedecida. Entre las principales características a tomar en cuenta en la selección del emisor son:
  - **Caudal uniforme**, poco sensible a las variaciones de presión.
  - Resistente a las condiciones de trabajo.
  - Poco sensible a obturaciones.
  - Alta uniformidad de fabricación.
  - Fácil instalación.

El agua de riego debe entrar en el sistema dotada de la presión necesaria para hacer funcionar correctamente a la instalación. El camino que sigue después hasta que se pone a disposición del cultivo es el siguiente: entra al **cabezal de riego** que está compuesto por una serie de elementos que la filtran y tratan, es decir ajustan su calidad a los requerimientos tanto del sistema de riego como del cultivo; entonces pasa a la **red de distribución** de la instalación donde es repartida a través de tuberías y elementos accesorios a las diferentes unidades y subunidades a regar; finalmente sale por los **emisores de riego**, que la aportan al suelo de donde podrá ser extraída por las plantas. (Gómez, 2010b)

Las principal característica que distingue las distintas formas de riego localizado, son las variantes de emisores con las que se puede integrar el sistema, las más comunes son:

### A.3.1

#### GOTEROS

Son la variante de riego localizado más utilizada. Este tipo de emisores son dispositivos de plástico que se localizan en las tuberías laterales, cuya función es disipar la presión y esto origina que el agua salga prácticamente sin velocidad, es decir "goteando". De acuerdo a su forma de instalación, se pueden clasificar como:

- **Interlinea o Insertados**, se instalan cortando la tubería y posteriormente esta se empalma en ambos lados.
- **Pinchados**, se colocan en un agujero previamente realizado en la tubería.
- **Integrados**, se encuentran instalados en la tubería desde su etapa de fabricación. (Gómez, 2010b)

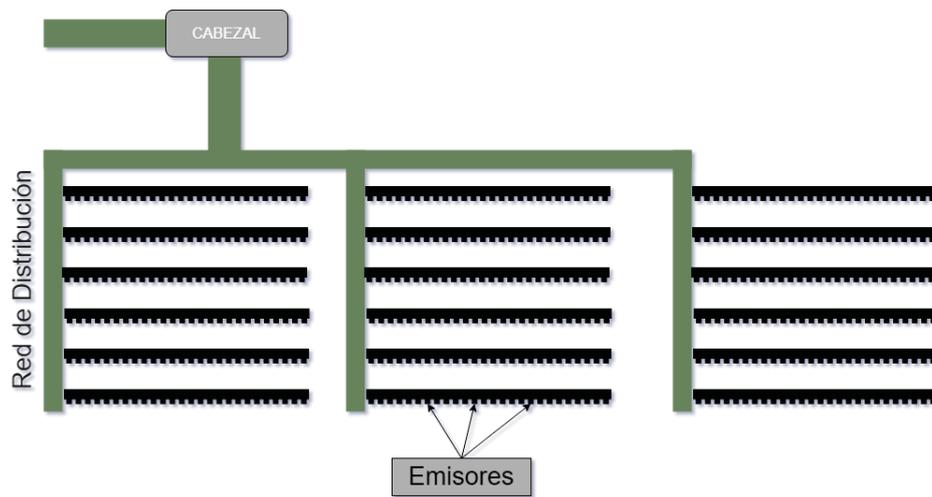


Fig. A.5 Esquema general de un sistema de riego localizado



Fig. A.6 Ejemplos de goteros Interlinea y Pinchados  
(Goteros insertados y Pinchados, 2019)

### A.3.2

## MICROASPERSORES Y DIFUSORES

Son emisores cuya función es la asemejar una llovizna, sin llegar a humedecer toda el área de cultivo. El uso de Microaspersores es más común que el de difusores. El principal uso de los difusores es en la jardinería e instalaciones bajo plástico (invernaderos y semilleros), debido a que generan un tamaño de gota tan pequeño, que es fácilmente dispersarle por el viento. (Gómez, 2010b)



Fig. A.7 Ejemplos microaspersor (tipo bailarina)  
(MICROASPERSOR MODULAR, 2019)

### A.3.3

## TUBERÍAS EMISORAS

Es una versión, en la que la tubería conduce y aplica el agua de forma simultánea mediante los orificios realizados durante el periodo de fabricación o a través de su pared porosa. Las tuberías emisoras más utilizadas, son:

- **Tubería perforada**, son tubos de PE en los que se realizan orificios a un espaciado constante, en función de la presión de trabajo, el agua puede salir como chorro o en forma de gota.
- **Tubería goteadora**, se compone de dos partes: el tubo (que conduce el agua) y un laberinto que disipa la presión y produce la salida gota a gota.
- **Tubería porosa o exudante**, el agua sale de la tubería y se aplica al suelo mediante un material poroso, suministra caudales menores en comparación con otros sistemas de riego localizado, aunque la banda de humedad continúa.

(Gómez, 2010b)

## A.4 COMPARATIVA DE TIPOS DE RIEGO

A continuación, se presenta en la Tab. A.1 una comparativa general que muestra las ventajas y desventajas de las variantes de sistemas de riego. (Sánchez, 2002)

<b>Tipo de riego</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Superficie	Permite el riego de suelos con baja permeabilidad. El equipo de operación del sistema es fácil y sencillo de manejar.	Solo se puede aplicar a cultivos resistentes a la inundación. Es difícil aplicar laminas pequeñas. No se debe aplicar en suelos arenosos o agrietables.
Aspersión	-Evita la erosión del suelo. -No requiere nivelación. -Se tiene un mayor control en la aplicación del agua.	-No se debe aplicar a cultivos susceptibles a enfermedades fungosas. -No es factible aplicar agua con altos contenidos de sales. -No es factible con altas velocidades de viento, altas temperaturas y altas evaporaciones. -Costos iniciales altos.
Localizado	-Se puede emplear en suelos de cualquier textura. -No requiere nivelación -Se tiene un mayor control en la aplicación del agua -Incrementa substancialmente el rendimiento de los cultivos. -Facilita la aplicación de agroquímicos. -Permite la automatización total.	-Es alto el coste inicial. -Aumentan las posibilidades de enfermedades y plagas. -Hay riesgo de taponamiento de los emisores. -Los fertilizantes deben ser altamente solubles. -Se requieren instalaciones de filtrado.

**Tabla A.1** Comparativa entre sistemas de riego

Dentro de un sistema de bombeo es necesario el considerar elementos que sirven para darle más flexibilidad al sistema y poder tener mayor control sobre sus características de operación y mantenimiento. Estos dispositivos generan una carga hidráulica mayor al sistema y esta se encuentran en función de las consideraciones de operación de cada uno de los elementos.

En la tabla B.1 se muestra el coeficiente de pérdidas relacionado a los accesorios más comunes a encontrar en los sistemas de tuberías.

Accesorio	$k_m$
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 3/4 de apertura	1.00-1.15
Válvula de compuerta con 1/2 de apertura	5.6
Válvula de compuerta, con 1/4 de apertura	24.0
Codo de radio corto	0.9
Codo de radio mediano	0.75-0.80
Codo de gran radio	0.6
Codo de 45°	0.4-0.42
Retorno (curva en U)	2.2
"T" en sentido recto	0.3
"T" a través de la salida lateral	1.8
Unión	0.3
"Y" de 45°, en sentido recto	0.3
"Y" de 45°, en 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

**Tabla B.1** Coeficiente de pérdida menores para codos y accesorios.

(Saldarriaga, 2016)

ANEXO C

# FORMATOS

C.1

## **FORMATO DE LEVANTAMIENTO DE MEDICIÓN DE BOMBA**

Se presenta el documento que se desarrolló para registrar la información obtenida durante los trabajos de obtención de información, particularmente los datos que caracterizan el desempeño de la bomba del sistema.

## REPORTE PARA LEVANTAMIENTO DE DATOS DE SISTEMA DE BOMBEO

Propietario					
Domicilio:					
Localización del pozo:					
<b>PARAMETROS DE LA BOMBA</b>					
Marca:		Modelo:			
Carga total:		No. De pasos			
Eficiencia:					
<b>DATOS DE COLUMNA</b>					
Diametro de succión		Diametro de la flecha:			
<b>DATOS DE PLACA DE MOTOR</b>					
Marca:		Modelo:			
Eficiencia:		Tensión de operación			
Potencia:		Frecuencia de rotación:			
Corriente:					
<b>INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN</b>					
VARIABLE	TIPO	MODELO	CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN		
			EXACTITUD	EXPEDIDO POR	FECHA DE VEN.
FLUJO					
PRESIÓN					
NIVEL DINAMICO					
POTENCIA ELÉCTRICA (MED. DIRECTA)					
VOLMETRO					
AMPERIMETRO					
FACTORIMETRO					
<b>DURACIÓN PRUEBA</b>					
FECHA		RESPONSABLE			
HORA DE INICIO		HORA DE FIN:			

**REPORTE PARA LEVANTAMIENTO DE DATOS DE SISTEMA DE BOMBEO**

ITEM	SIMBOLO	DESCRIPCIÓN	1	2	3	4
1	Di	<i>Diametro Interno de la tubería</i>				
2	n	<i>Frecuencia de rotación</i>				
3	ND	<i>Nivel Dinamico</i>				
4	x	<i>Distancia desde el nivel de referencia a la linea de centros del manometro</i>				
5	P1					
6	Pm	<i>Lectura del manómetro a la descarga</i>				
7	A	<i>Area del tubo a la descarga</i>				
8	qv	<i>Flujo</i>				
9	hv	<i>Carga de velocidad</i>				
10	hfc	<i>Perdidas de fricción en la columna</i>				
11	hd	<i>Carga a la descarga</i>				
12	H	<i>Carga total</i>				
13	IA	<i>Corriente Linea A</i>				
	IB	<i>Corriente Linea B</i>				
	IC	<i>Corriente Linea C</i>				
	I	<i>Promedio</i>				
14	VAB	<i>Tensión fase AB</i>				
	VAC	<i>Tensión fase AC</i>				
	VBC	<i>Tensión fase BC</i>				
	V	<i>Promedio</i>				
15	fpA	<i>Factor de potencia A</i>				
	fpB	<i>Factor de potencia B</i>				
	fpC	<i>Factor de potencia C</i>				
	fp	<i>promedio</i>				
16	Pe	<i>Potencia de entrada al motor</i>				
17	Ps	<i>Potencia de salida de la bomba</i>				
18	h	<i>Eficiencia electromecanica</i>				

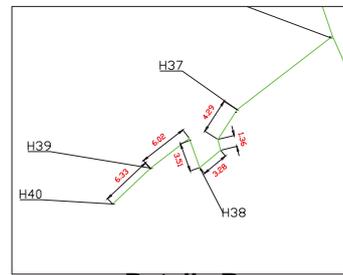
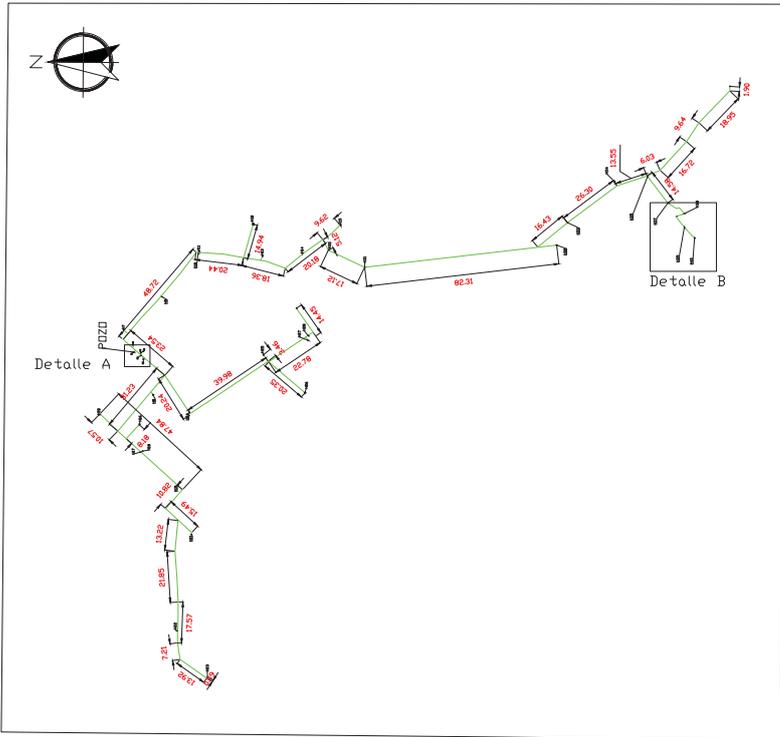
ANEXO D

# DOCUMENTOS COMPLEMENTARIOS

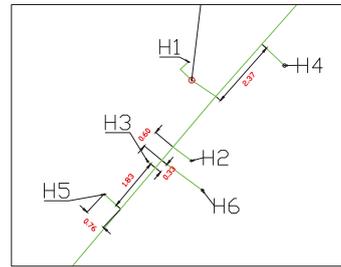
D.1

## PLANO DE RED DE TUBERÍAS

El siguiente plano se elaboró mediante los trabajos de levantamiento, esta es una aproximación de los recorridos de la red de distribución del sistema de riego. Esta información se obtuvo mediante un recorrido en compañía de los usuarios de la red, de acuerdo a los puntos y trazos que ellos indicaron.



**Detalle B**  
**860:1**



**Detalle B**  
**3059:1**

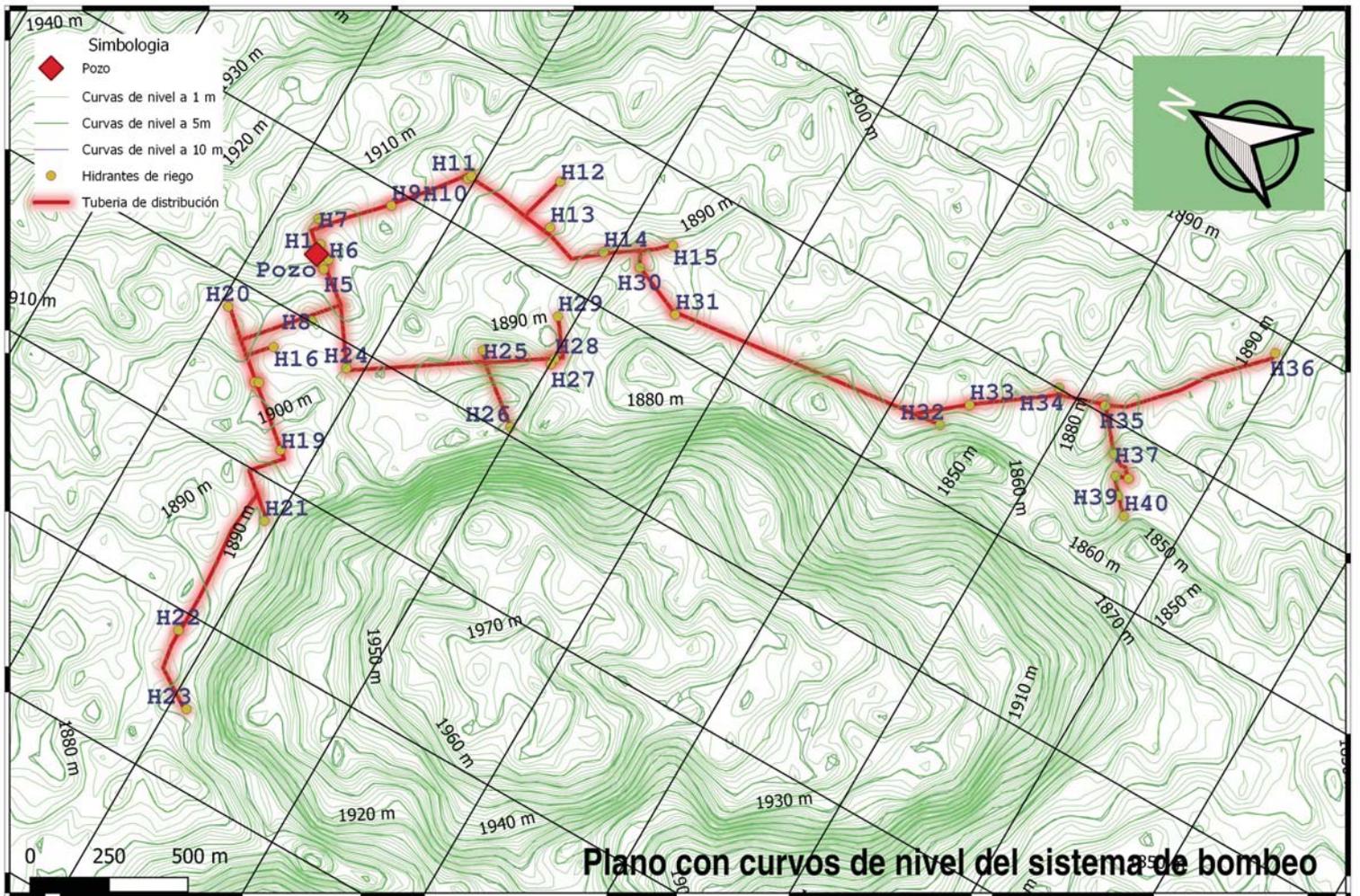
**Longitud de tramos de tubería  
del Sistema de Bombeo para Riego Agrícola**

PROYECTO: <b>DIAGNOSTICO ENERGETICO SISTEMA DE BOMBEO SANTA CLARA HUITZILTEPEC, PUEBLA</b>			
ESP. AHORRO Y USO EFICIENTE DE LA ENERGIA			
TITULO: <b>PLANO SISTEMA DE TUBERIAS</b>			PLANO N°: 1
ELABORO : HEMA	REVISO : RDVSO	ESCALA : 243:1	REV. : 1,0
DIBUJO : HEMA	APROBO : APROBO	FECHA : 04/2020	TRABAJO : NA

## D.2 **PLANO DE RED DE TUBERÍAS CON CURVAS DE NIVEL**

---

El siguiente plano representa el plano mostrado en el Anexo D.1 sobre las curvas de nivel que representan la orografía de la zona en que se encuentra, esto con el fin de poder determinar si existe una carga adicional debido a la carga vertical que pudiera presentarse.



## REFERENCIAS

- AGRICULTURA, F. I. E. R. C. L. (2020). *Agrocostos interactivos*. <https://www.fira.gob.mx/agrocostosApp/AgroApp.jsp>.
- Alocén, J. C. (2007). *Manual práctico para el diseño de sistemas de minirriego*. PESA.
- ¿cómo prolongar la vida útil de un variador de frecuencia? (2021, 06). Descargado de <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=2878&ni=como-prolongar-la-vida-util-de-un-variador-de-frecuencia>
- CONUEE/GIZ. (2014). *Guía para realizar diagnósticos energéticos y evaluar medidas de ahorro en equipos de bombeo de agua de organismos operadores de agua potable*.
- Cortijo, F. J. M. (2014). *Introducción al riego*. Universitat Politècnica de València.
- de Economía, S. (s.f.). *Catálogo mexicano de normas*.
- de Normas, D. G. (Ed.). (s.f.). *Norma Mexicana NMX-AA-179-SCFI-2018, MEDICIÓN DE DE VOLÚMENES DE AGUAS NACIONALES USADOS, EXPLOTADOS O APROVECHADOS, date = 21/09/2018, year=2018*.
- Gómez, R. F. (2010a). *Manual de riego para agricultores: Fundamentos de riego*. Consejería de Agricultura y Pesca. Andalucía.
- Gómez, R. F. (2010b). *Manual de riego para agricultores: Riego localizado*. Consejería de Agricultura y Pesca. Andalucía.
- Gómez, R. F. (2010c). *Manual de riego para agricultores: Riego por aspersión*. Consejería de Agricultura y Pesca. Andalucía.
- Goteros insertados y pinchados. (2019, 08). Descargado de <https://www.novagric.com/es/goteros-insertados-pinchados>
- INEGI. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los estados unidos mexicanos. huitziltepec, Puebla*. Descargado de [http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/21/21079.pdf](http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/21/21079.pdf)
- Juan Jose Ibáñez, F. J. M. C. (2019, 11). *Chernozems (suelos de praderas, estepas y pampas)*. Descargado de <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2014/04/26/145061>
- Microaspersor modular. (2019, 08). Descargado de <http://www.agroplast.es/sistemas-de-riego-productos/microaspersion/microaspersor-modular>
- Normas Oficiales Mexicanas. (2020, 05). Descargado de <https://www.gob.mx/salud/en/documentos/normas-oficiales-mexicanas-9705>
- Novagric. (2016). *Instalaciones de riego*. <https://www.novagric.com/es/riego/servicios/instalaciones-de-riego>.
- Pérez Abril, I., Ali Dauod, H. Z. M., Jara González, V. R., y De León Benítez, C. A. (2017). Procedimiento para el análisis energético de sistemas de bombeo centrífugos.
- Pívots. (2019, 09). Descargado de <https://www.novagric.com/es/riego/materiales-de-riego/pivots-de-riego>
- Saldarriaga, J. (2016). *Hidráulica de tuberías. abastecimiento de agua, redes y riegos*. (Tercera edición ed.). Alfaomega.
- SENER (Ed.). (2005). *Norma Oficial Mexicana NOM-010-ENER-2004, Eficiencia energetica del conjunto motor bomba sumergible tipo pozo profundo. Límites y metodo de prueba*.
- SENER (Ed.). (2015). *Norma Oficial Mexicana NOM-006-ENER-2015, Eficiencia energética electromécanica en sistemas de bombeo para pozo profundo en operación. Límites y métodos de prueba*.
- SENER (Ed.). (2019). *Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012, Instalaciones Eléctricas (utilización)*.
- Sánchez, J. G. (2002). *Introducción al diseño de zonas de riego y drenaje*.
- Tarifa 9 nocturna. (2020, 05). Descargado de <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCREIndustria/Tarifas/AgricolaNocturna.aspx>
- Tarifa RABT. (2020, 05). Descargado de <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRENegocio/Tarifas/RiegoAgricolaBT.aspx>
- Tarifas-Disposiciones Complementarias. (2020, 10). Descargado de <https://www.cfe.mx/industria/tarifas/Pages/disposiciones-complementariasant.aspx>
- Tun Dzul, J. d. I. C., Ramírez Jaramillo, G., Cano González, A. d. J., y Sanchez Cohen, I. (2016). Manejo eficiente del riego por microaspersión en huertas de naranja dulce del sur de Yucatán.
- Yunus A. Cengel, J. M. C. (2018). *Mecánica de fluidos. fundamentos y aplicaciones*. McGraw Hill.