



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

ANÁLISIS HIDRÁULICO EN FLUJO ESTABLECIDO DE UNA RED DE POZOS

TESINA

Que para obtener el título de
Especialista en Hidráulica Urbana

P R E S E N T A

Martínez Severiano Isaac David

DIRECTORA DE TESINA

M.C. Libia Georgina Carmona
Paredes



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018

Agradecimientos

A la UNAM por brindarme la oportunidad de cursar la especialidad.

A mi padre por todas sus enseñanzas y consejos que han sido el cimiento sobre el cual se fundamentan mis logros y metas.

A mi madre por su amor, comprensión y apoyo a lo largo de mi vida profesional.

A mis hermanos que siempre han estado ahí para apoyarme en todo.

A mis profesores por la excelencia con la que impartieron sus clases y principalmente por transmitirme parte de sus conocimientos. Agradezco especialmente a la maestra Libia Georgina Carmona Paredes por sus atinados consejos durante la realización de esta tesina.

Contenido

1	Objetivo	1
2	Introducción	1
3	Antecedentes	2
4	Marco teórico.....	7
4.1	Modelación matemática de la operación en flujo establecido.....	7
5	Análisis en flujo establecido	10
5.1	Análisis con gasto de diseño (351 l/s)	10
5.1.1	Cálculo del factor de fricción.....	10
5.1.2	Incremento en el factor de fricción.....	12
5.1.3	Cálculo de las pérdidas a lo largo de la conducción principal	13
5.1.4	Procedimiento para el cálculo de presiones en los nudos de la línea principal..	14
5.1.5	Cálculo de la carga de presión.....	18
5.1.6	Cálculo de la carga piezométrica y energía total	18
5.1.7	Cálculo de la carga de bombeo	20
5.2	Análisis con gasto de operación (271 l/s).....	23
5.2.1	Cálculo del factor de fricción.....	23
5.2.2	Incremento en el factor de fricción.....	24
5.2.3	Cálculo de las pérdidas a lo largo de la conducción principal	24
5.2.4	Cálculo de la carga de presión.....	25
5.2.5	Cálculo de la carga piezométrica y energía total	26
5.2.6	Cálculo de la carga de bombeo	27
5.3	Comparación de las cargas de bombeo	28
5.4	Curvas características de las bombas.....	29
6	Conclusión	36
7	Referencias.....	38

1 Objetivo

El presente trabajo tiene como finalidad revisar el diseño de las tuberías y analizar el funcionamiento en flujo establecido con gasto parcial de una red de pozos. Tomando en consideración que el diseño se realiza para el gasto de diseño, se determinaron las características del equipo de bombeo óptimo para la extracción de agua de cada uno de los pozos.

2 Introducción

El agua es un elemento de suma importancia para la vida, por tal motivo, las antiguas civilizaciones intentaron ubicarse cerca de una fuente natural de agua. Conforme incrementaba la población y por consecuencia también la demanda hacia este recurso los avances tecnológicos también lo hacían, permitiendo al hombre transportar y almacenar el agua.

Actualmente, su uso en las poblaciones es diverso, pues sirve para consumo humano, en el aseo personal, en actividades domésticas, comerciales, públicas e industriales.

Dadas las demandas en cuanto a volumen y actividad la distribución del agua es una acción de suma importancia en cada pueblo, ciudad y nación existente.

La distribución de este recurso debe tener las siguientes características: volumen suficiente de agua, con una calidad requerida y a una presión adecuada para abastecer los depósitos y evitar las presiones que pongan en riesgo a las instalaciones para su tratamiento y distribución. A su vez, para abastecer de agua a una población se requiere de instalaciones que permitan captar, purificar, almacenar y finalmente distribuir el agua en las poblaciones.

Mantener toda la infraestructura en buenas condiciones para una buena entrega del recurso a cada uno de los usuarios es de suma importancia, los ingenieros hidráulicos tienen la obligación de analizar cada una de las variantes posibles que puedan afectar un buen funcionamiento de un sistema hidráulico, y de esta forma elegir el equipo necesario y determinar políticas de operación; estas son actividades de suma importancia en un proyecto hidráulico.

3 Antecedentes

El proyecto que a continuación se presenta está planeado para construirse en dos etapas. La primera, consiste en extraer agua de siete pozos para entregar un gasto de 271 l/s al tanque llamado San Ramón. En la segunda etapa se incorporará un gasto de 80 l/s para entregar en total 351 l/s al tanque San Ramón.

Dicho proyecto está localizado en Baja California Sur, México.

El diseño se realizó para los 351 l/s, este trabajo consiste en revisar la operación de la primera etapa del proyecto.

En la figura 3.1 se muestra un esquema de la red de pozos que compete a este trabajo, dicha red está constituida de 7 pozos (nombrados Pozo 1, 2, 3, 4, 5, San Pedro 1, San Pedro 2) de igual forma tenemos un cárcamo de rebombear denominado SAPA, en donde llegan aportaciones de San Pedro 1 y San Pedro 2. Por último tenemos el tanque San Ramón el cual es el destino final de la extracción de cada uno de los pozos antes mencionados.

En la Tabla 3.1 se indican los gastos que aportan cada uno de los pozos, sus cadenamientos y niveles dinámicos.

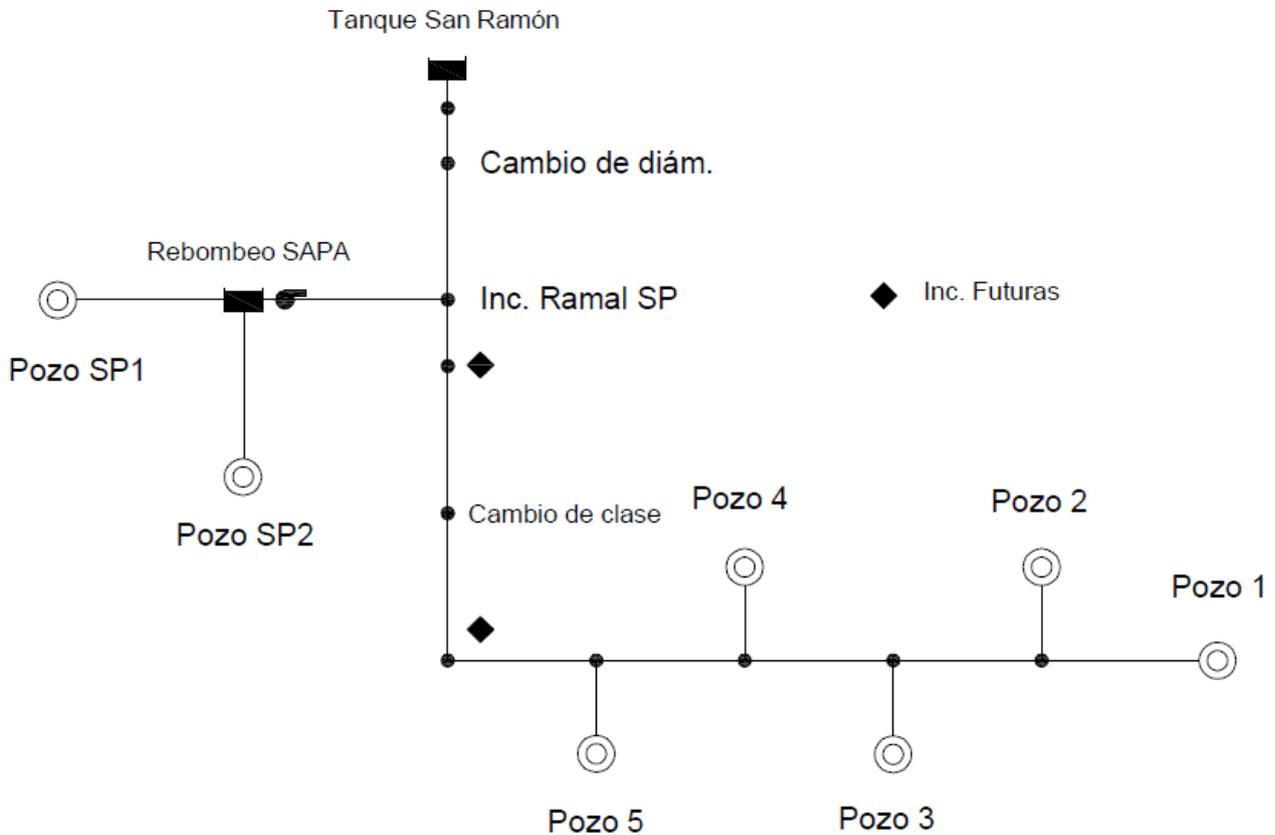


Figura 3. 1 Esquema general de la red de pozos

Aportación	Caudal (l/s)	Cadenamiento (km)	Nivel dinámico (m)
Pozo1	15	0+000	120
Pozo2	45	0+848	101
Pozo3	60	1+554	85
Pozo4	40	2+282	78
Pozo5	6	2+839	120
Pozo San Pedro 1 10R	45	21+476	90.67
Pozo San Pedro 2 20R	60	21+476	91
TOTAL	271		

Tabla 3.1 Aportaciones de los pozos

En la figura 3.2 observamos el número de pozo y su correspondiente aportación en l/s a la red

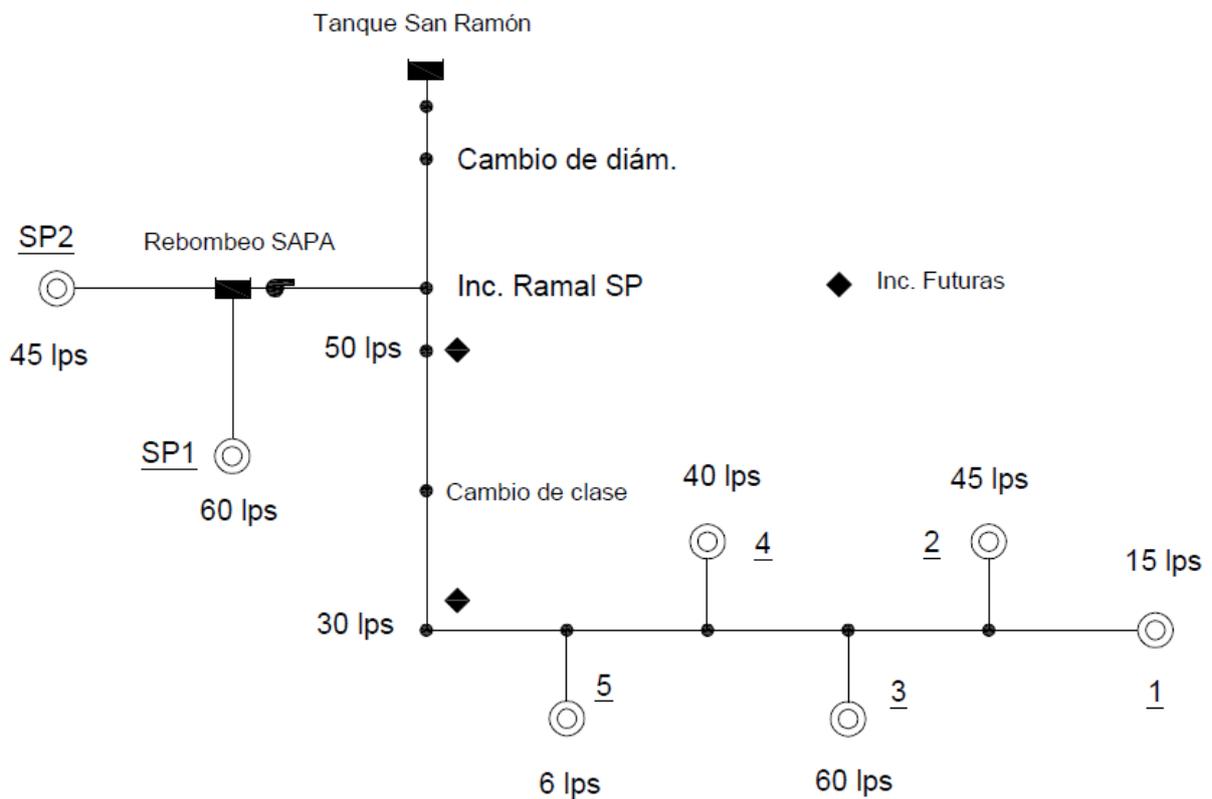


Figura 3. 2 Aportaciones de los pozos

En la tabla 3.2 se presentan las características de los diferentes tramos en los que se ha dividido la línea principal de conducción. La tabla incluye los valores de los diámetros y la resistencia de la tubería, propuestos con base en análisis preliminares.

Tramo	Cadenamiento inicial (km)	Cadenamiento final (km)	Q (l/s)	D (")	L (m)	Resistencia (kg/cm ²)
Pozo 1- Pozo 2	0+000	0+848	15	6	848.14	7
Pozo 2- Pozo 3	0+848	1+554	60	10	706.26	7
Pozo 3- Pozo 4	1+554	2+282	120	14	727.93	7
Pozo 4- Pozo 5	2+282	2+839	160	16	556.81	7
Pozo 5-inc. Futura 30lps	2+839	3+500	166	16	660.87	7
Inc.Futura 30 l/s-Cambio de clase	3+500	11+000	196	18	7500	7
Cambio de clase-Inc. Futura 50 l/s	11+000	20+500	196	18	9500	10
Inc.Futura 50 l/s-Ramal San Pedro	20+500	21+476	246	20	975.72	10
Ramal San Pedro-Cambio de Diám.	21+476	33+000	351	24	11524.28	7
Cambio de Diám. a Tanque SAPA	33+000	36+927	351	20	3926.67	7
T. SAPA a Tanque San Ramón	36+927	38+371	351	20	1444.6	7

Tabla 3. 2 Características de la conducción (línea principal)

En todos los casos se propone tubería de PVC serie métrica. Los gastos indicados en la tabla corresponden al caudal conducido en el tramo en cuestión.

Adicionalmente, en las tablas 3.3 y 3.4 se presentan las características de las conducciones en el ramal San Pedro y en las líneas de interconexión de los pozos a la línea principal.

Tramo	Q (l/s)	D (")	L (m)	Resistencia (kg/cm ²)
Pozo SP1 - Interconexión Pozo SP2	45	10	825	10
Pozo SP2 - Interconexión Pozo SP1	60	10	475	10
Interconexión pozos SP - Línea principal	105	14	1730	10

Tabla 3. 3 Características de la conducción (ramal San Pedro)

Tramo	Q (l/s)	D (")	L (m)	Resistencia (kg/cm ²)
Pozo 2 - línea principal	45	10	50.88	7
Pozo 3 - línea principal	60	10	84.14	7
Pozo 4 - línea principal	40	8	33.74	7
Pozo 5 - línea principal	6	4	50.61	7

Tabla 3. 4 Características de la conducción (interconexión de pozos)

Con la información descrita anteriormente es posible el realizar un análisis hidráulico definiendo primeramente la carga requerida en cada nodo (conexión entre tramo de cada pozo a la línea principal) para así poder definir el equipo de bombeo adecuado.

En la tabla 3.5 y 3.6 se muestran las cotas del terreno de cada uno de los pozos y de los nudos respectivamente.

Pozo	Gasto (l/s)	Cota de terreno (msnm)
1	15	214.7
2	45	204.28
3	60	195.88
4	40	186.33
5	6	181.49
SP1 (10R)	45	104.56
SP2 (20R)	60	108.34

Tabla 3. 5 Cota de terreno de los pozos

Nudo Correspondiente	Cota terreno (msnm)
10	204.28
9	195.88
8	186.33
7	181.49
6	176.6
5	154.35
4	128.9
3	130.67
2	144.06
1	108.56
Rebombeo SAPA	110.67
	Carga de posición (z)
Tanque San Ramón	149.71

Tabla 3. 6 Cota de terreno de los nudos

Las figuras 3.3 y 3.4 muestran los perfiles de la línea principal de la conducción y del ramal San Pedro, respectivamente.

Cabe recalcar que la revisión se realizó considerando un gasto de 271 l/s, pero el diseño de la red de pozos se realizó con dos incorporaciones (30 y 50 l/s) los cuales están indicados en la figura 3.2.

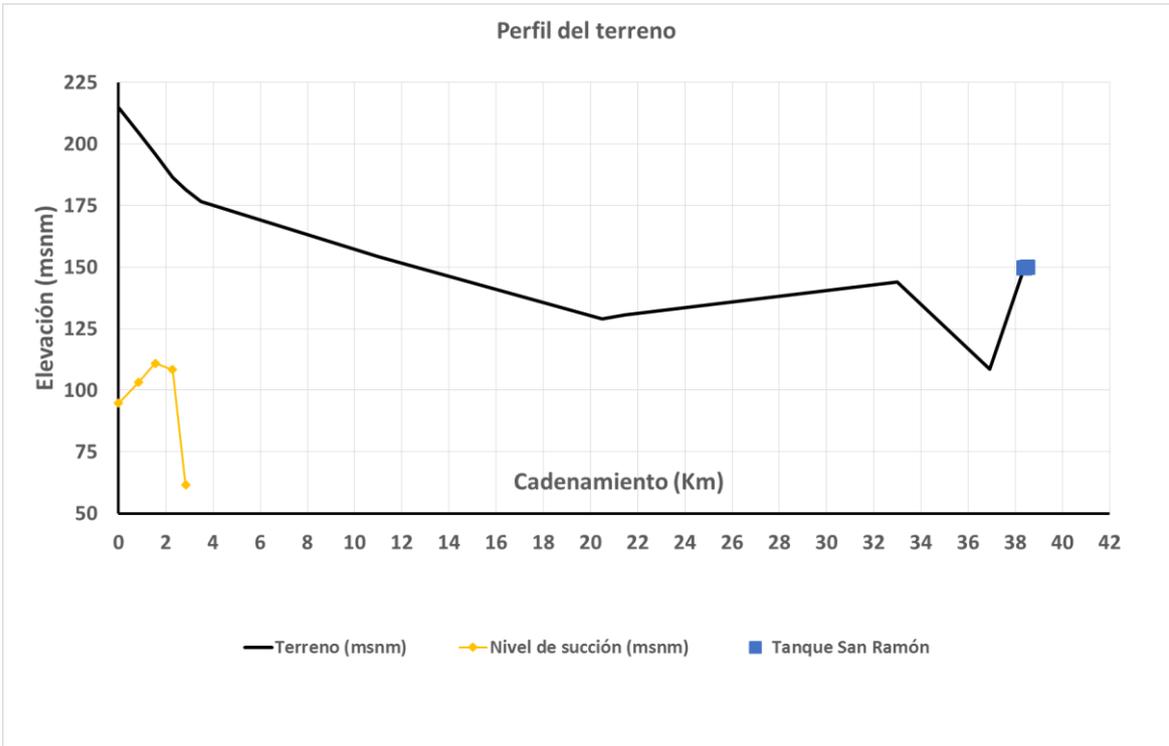


Figura 3. 3 Perfil de la conducción (línea principal)

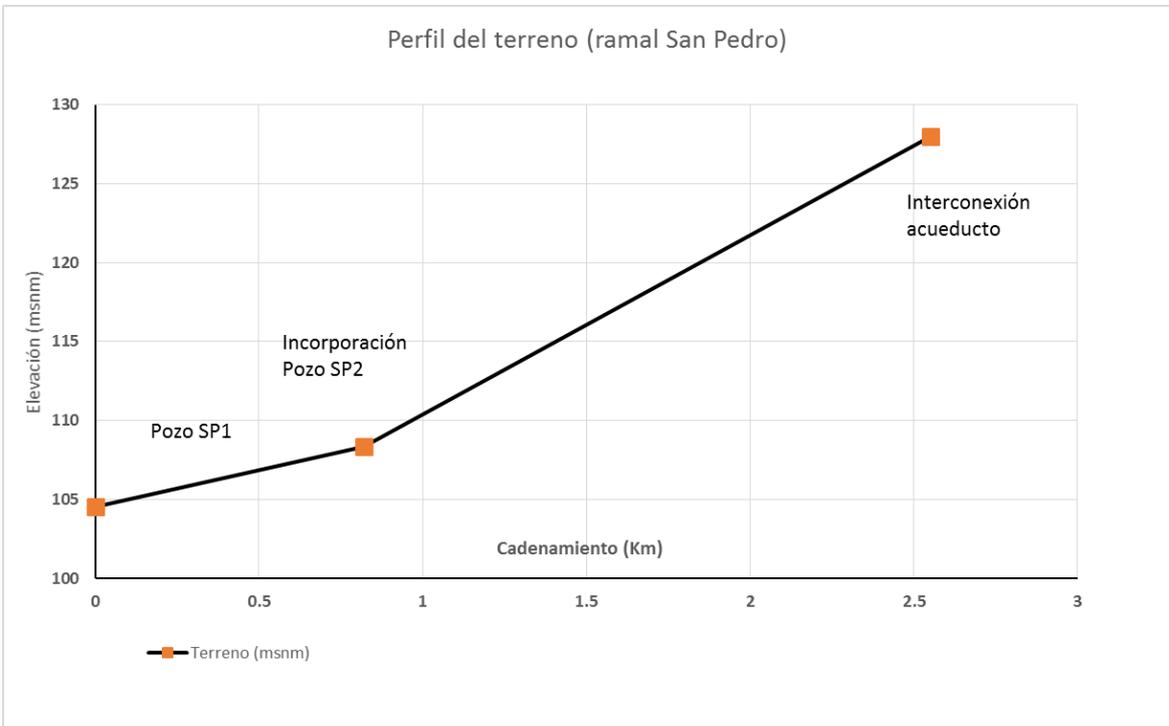


Figura 3. 4 Perfil de la conducción (ramal San Pedro)

4 Marco teórico

Dadas las condiciones planteadas en el marco físico de la red de pozos, se realizará el análisis hidráulico en operación normal es decir en flujo establecido con el fin de analizar las características hidráulicas de las líneas de conducción propuestas con anterioridad a este trabajo y determinar los equipos de bombeo, para en principio llevar el agua de cada pozo a la línea principal y posteriormente al tanque San Ramón (destino final).

4.1 Modelación matemática de la operación en flujo establecido.

Las ecuaciones que rigen el funcionamiento hidráulico a gasto establecido o constante son las ecuaciones de continuidad y la ecuación de la energía, las cuales involucran el gasto, velocidad, presión del fluido en la conducción, las pérdidas de energía provocadas por la fricción existente con el material de la tubería en contacto y las pérdidas locales .

Ecuación de la continuidad

Para un fluido incompresible, en dos secciones de una conducción se tiene:

$$Q_1 = Q_2 \dots \dots (1)$$

$$A_1V_1 = A_2V_2 \dots \dots (2)$$

Sin embargo en donde se intersectan dos o más tubos la ecuación (2) queda expresada en función de las aportaciones de cada una de las secciones:

$$A_1V_1 = A_2V_2 + A_3V_3 + \dots + A_iV_i \dots \dots (2.1)$$

De donde:

Q, gasto de la conducción, en m^3/s .

V, velocidad del fluido en la tubería, m/s

A, área de la tubería, m^2

i, número de secciones

Ecuación de la energía.

$$Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} = Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + hr \dots (3)$$

Definiendo

$$H_1 = Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g}$$

y

$$H_2 = Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g}$$

La ecuación 3 se puede escribir como:

$$H_1 - H_2 = hr \dots (4)$$

En donde,

z , carga de posición (m).

$\frac{V^2}{2g}$, carga de velocidad (m).

$\frac{P}{\rho g}$, carga de presión (m).

hr , pérdidas totales (m).

$$hr = \left(\frac{fl}{D} + k \right) \frac{V^2}{2g} \dots (5)$$

En donde,

l , longitud de la conducción, en m.

f , factor de fricción

D , diámetro, en m

k , coeficiente de pérdida local

Para la obtención del factor de fricción se utilizó la expresión de Swamme-Jain, la cual esta expresada de la siguiente forma. (La ecuación de Swamme-Jain es valida para un número de Reynolds mayor a 4000). Las pérdidas locales serán incluidas dentro de las de fricción, por el motivo que se indica más adelante.

$$f = \frac{0.25}{\left(\log \left(\frac{\frac{\varepsilon}{D}}{3.71} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right)^2} \dots (6)$$

De donde:

ε , rugosidad absoluta , en mm.

Re , número de Reynolds.

D , diámetro interior del tubo, mm.

El número de Reynolds está dado por la siguiente ecuación.

$$Re = \frac{VD}{\nu} \dots (7)$$

La viscosidad cinemática ν varía con la temperatura, para una temperatura de 20° C la viscosidad es de:

$$\nu = 1.1 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

5 Análisis en flujo establecido

5.1 Análisis con gasto de diseño (351 l/s)

5.1.1 Cálculo del factor de fricción

La rugosidad absoluta se obtuvo de: tabla 8.1 rugosidad absoluta " ε " en tubos comerciales; Sotelo.

El material de la red de la tubería es PVC, material que es catalogado como tubo liso 'plástico y tiene asignada una rugosidad absoluta de $\varepsilon = 0.0015mm$

Conocidas las incógnitas en la expresión de Swamme-Jain procedemos al cálculo del coeficiente de fricción para cada una de las conexiones de pozo a la línea principal, ramal San Pedro y para los tramos ubicados sobre la línea principal, los cálculos se muestran a continuación en la tabla 5.1, 5.2 y 5.3 respectivamente.

Tramo	Q (l/s)	D (")	L (m)	D (m)	Área (m ²)	Velocidad (m/s)	e/D (10 ⁻⁶)	Viscosidad ($\frac{m^2}{s}$) (10 ⁻⁶)	Re	f
Pozo 2 - línea principal	45	10	50.88	0.254	0.051	0.888	5.906	1.1	205067.214	0.016
Pozo 3 - línea principal	60	10	84.14	0.254	0.051	1.184	5.906	1.1	273422.952	0.015
Pozo 4 - línea principal	40	8	33.74	0.2032	0.032	1.233	7.382	1.1	227852.460	0.015
Pozo 5 - línea principal	6	4	50.61	0.1016	0.008	0.740	1.476	1.1	68355.738	0.019

Tabla 5. 1 Cálculo del factor de fricción de cada pozo a la línea principal

Tramo	Q (l/s)	D (")	L (m)	D (m)	Área (m ²)	Velocidad (m/s)	e/D (10 ⁻⁶)	Viscosidad ($\frac{m^2}{s}$) (10 ⁻⁶)	Re	f
Pozo SP1 - Cárcamo de bombeo	45	10	825	0.254	0.051	0.888	5.906	1.1	205067.214	0.016
Pozo SP2 - Cárcamo de bombeo	60	10	475	0.254	0.051	1.184	5.906	1.1	273422.952	0.015
Cárcamo de bombeo - línea principal	105	14	1730	0.356	0.099	1.057	4.218	1.1	341778.690	0.014

Tabla 5. 2 Cálculo del factor de fricción (ramal San Pedro)

Tramo	Q (l/s)	Q (l/s)	D (")	L (m)	D (m)	Área (m ²)	Velocidad (m/s)	e/D (10 ⁻⁶)	Viscosidad ($\frac{m^2}{s}$) (10 ⁻⁶)	Re	f
Pozo 1- Pozo 2	15	15	6	848.14	0.152	0.018	0.822	9.843	1.1	113926.230	0.017
Pozo 2- Pozo 3	45	60	10	706.26	0.254	0.051	1.184	5.906	1.1	273422.952	0.015
Pozo 3- Pozo 4	60	120	14	727.93	0.356	0.099	1.208	4.218	1.1	390604.217	0.014
Pozo 4- Pozo 5	40	160	16	556.81	0.406	0.130	1.233	3.691	1.1	455704.919	0.013
Pozo 5-inc. Futura 30lps	6	166	16	660.87	0.406	0.130	1.280	3.691	1.1	472793.854	0.013
Inc. Futura 30 l/s-Cambio de clase	30	196	18	7500	0.457	0.164	1.194	3.281	1.1	496212.023	0.013
Cambio de clase-Inc. Futura 50 l/s	0	196	18	9500	0.457	0.164	1.194	3.281	1.1	496212.023	0.013
Inc. Futura 50 l/s-Ramal San Pedro	50	246	20	975.72	0.508	0.203	1.214	2.953	1.1	560517.051	0.013
Ramal San Pedro-Cambio de Diám.	105	351	24	11524.28	0.610	0.292	1.203	2.461	1.1	666468.445	0.012
Cambio de Diám. a Nudo 1	0	351	20	3926.67	0.508	0.203	1.732	2.953	1.1	799762.134	0.012
Nudo 1 a Tanque San Ramón	0	351	20	1444.6	0.508	0.203	1.732	2.953	1.1	799762.134	0.012

Tabla 5. 3 Cálculo del factor de fricción (tramos sobre línea principal)

5.1.2 Incremento en el factor de fricción

Debido a la calidad del agua de los pozos, se solicitó que el análisis se realizara con un incremento al factor de fricción de 40 %, de igual forma las pérdidas locales quedan ya incluidas. Los factores de fricción con los que se realizaron los análisis se indican en las tablas 5.4 a 5.6.

Tramo	f incrementado 40%
Pozo 2 - línea principal	0.022
Pozo 3 - línea principal	0.021
Pozo 4 - línea principal	0.021
Pozo 5 - línea principal	0.027

Tabla 5. 4 Incremento en factor de fricción (pozos a interconexiones)

Tramo	f incrementado 40%
Pozo SP1 - Cárcamo de Rebombeo	0.022
Pozo SP2 - Cárcamo de rebombeo	0.021
Cárcamo de rebombeo - línea principal	0.020

Tabla 5. 5 Incremento en factor de fricción (ramal San Pedro)

Tramo	f incrementado 40%
Pozo 1- Pozo 2	0.024
Pozo 2- Pozo 3	0.021
Pozo 3- Pozo 4	0.019
Pozo 4- Pozo 5	0.019
Pozo 5-inc. Futura 30 l/s	0.019
Inc. Futura 30 l/s-Cambio de clase	0.018
Cambio de clase-Inc. Futura 50 l/s	0.018
Inc. Futura 50 l/s-Ramal San Pedro	0.018
Ramal San Pedro-Cambio de Diám.	0.017
Cambio de Diám. a Nudo 1	0.017
Nudo 1 a Tanque San Ramón	0.017

Tabla 5. 6 Incremento en factor de fricción (línea principal)

5.1.3 Cálculo de las pérdidas a lo largo de la conducción principal

En la tabla 5.7, 5.8 ,5.9 se muestran las pérdidas por fricción de los tramos que constituyen a la red de los pozos, de igual forma cabe mencionar que las pérdidas locales se consideran ya Incluidas, debido al incremento solicitado del factor de fricción.

Tramo	hf (m)
Pozo 2 - línea principal	0.175
Pozo 3 - línea principal	0.487
Pozo 4 - línea principal	0.274
Pozo 5 - línea principal	0.379

Tabla 5. 7 Pérdidas por fricción (pozos a interconexiones)

Tramo	hf (m)
Pozo SP1 - Cárcamo de Rebombeo	2.835
Pozo SP2 - Cárcamo de rebombeo	2.749
Cárcamo de rebombeo - línea principal	5.465

Tabla 5. 8 Pérdidas por fricción (ramal San Pedro)

Tramo	hf (m)
Pozo 1- Pozo 2	4.686
Pozo 2- Pozo 3	4.087
Pozo 3- Pozo 4	2.932
Pozo 4- Pozo 5	1.988
Pozo 5-inc. Futura 30lps	2.524
Inc. Futura 30 l/s-Cambio de clase	21.958
Cambio de clase-Inc. Futura 50 l/s	27.813
Inc. Futura 50 l/s-Ramal San Pedro	2.600
Ramal San Pedro-Cambio de Diám.	24.369
Cambio de Diám. a Nudo 1	20.049
Nudo 1 a Tanque San Ramón	7.376

Tabla 5. 9 Pérdidas por fricción (línea principal)

5.1.4 Procedimiento para el cálculo de presiones en los nudos de la línea principal

Se ejemplificará el proceso de cálculo llevado a cabo para la estimación de las presiones en cada uno de los nudos de la línea principal.

- Partiendo de las condiciones que son conocidas en la superficie libre del agua en el tanque San Ramón

$$\text{Carga de velocidad} \left(\frac{v^2}{2g} \right) = 0$$

$$\text{Carga de presión} \left(\frac{P}{\rho g} \right) = 0$$

$$\text{Carga de posición (z)} = 149.71 \text{ m}$$

- Se procede al cálculo de las pérdidas por fricción hasta el siguiente nudo, que en este caso es el denominado “NUDO 1”, ver figura 5.1.

En la figura 5.1 podemos apreciar la distancia entre el tanque San Ramón y el nudo 1, así como el diámetro y rugosidad absoluta de la tubería (características necesarias para el cálculo de las pérdidas por fricción).



Figura 5. 1 Cálculo de la carga presión en "Nudo 1"

Por lo tanto la pérdida por fricción queda expresada de la siguiente forma

$$hf = \frac{fl V^2}{D 2g} = \frac{(0.016)(1444.6 m) \left(1.732 \frac{m}{s}\right)^2}{(0.508m)(2) \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right)} = 7.376 m$$

$$hl = 0 m$$

- A continuación se calcula la carga de velocidad en el nudo 1

$$\frac{v^2}{2g} = \frac{\left(1.731 \frac{m}{s}\right)^2}{(2) \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right)} = 0.1528 m$$

- Procedemos a aplicar la ecuación de la energía para calcular la carga de presión en el nudo 1

$$Z_{TS} + \frac{V_{TS}^2}{2g} + \frac{P_{TS}}{\rho g} + hf = Z_{N1} + \frac{V_{N1}^2}{2g} + \frac{P_{N1}}{\rho g}$$

Sustituyendo valores tenemos:

$$149.71 \text{ m} + 0 + 0 + 7.376 = 108.56 + 0.152 + \frac{P_{N1}}{\rho g}$$

Despejando la carga de presión tenemos:

$$\frac{P_{N1}}{\rho g} = 149.71 + 7.376 - 108.56 - 0.152 = 48.373 \text{ m}$$

A su vez la presión en el nudo 1 queda expresada como:

$$P_{N1} = (48.373 \text{ m}) \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) = 474.539 \text{ (kpa)}$$

La figura 5.2 muestra la simbología y nomenclatura asociada a cada uno de los nudos ubicados sobre la línea principal.

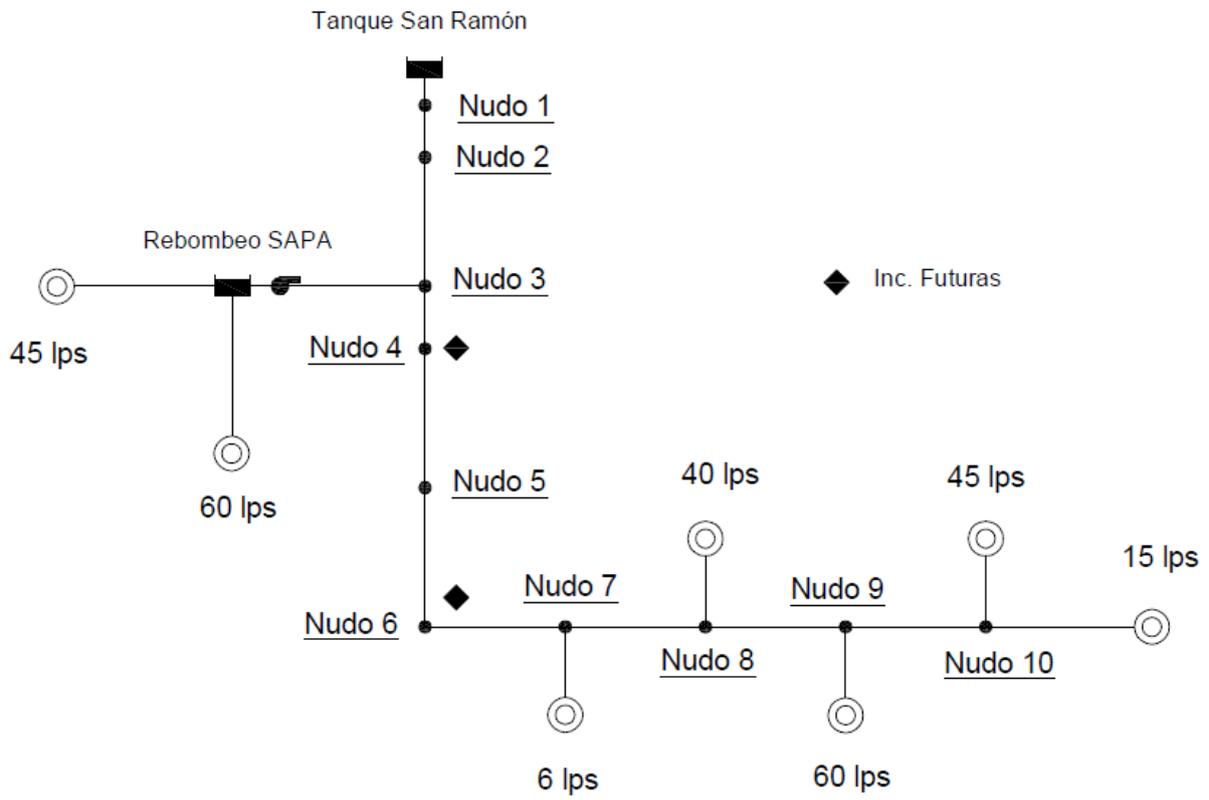


Figura 5. 2 Esquema general de la nomenclatura en cada uno de los nudos

5.1.5 Cálculo de la carga de presión

La tabla 5.10 muestra el resumen del cálculo de la carga de velocidad y carga de presión existente en cada uno de los nudos, mediante el procedimiento antes descrito.

Nudo Correspondiente	Carga de Posición (msnm)	Carga de velocidad (m)	Carga de Presión (m)
10	204.280	0.071	61.055
9	195.880	0.074	65.364
8	186.330	0.078	71.980
7	181.490	0.083	74.826
6	176.600	0.073	77.203
5	154.350	0.073	77.495
4	128.900	0.075	75.129
3	130.670	0.074	70.760
2	144.060	0.153	32.923
1	108.560	0.153	48.373
Tanque San Ramón	149.710	0	0
Rebombero SAPA	112.670	0	0

Tabla 5. 10 Cálculo de la carga de presión en cada de los nudos

5.1.6 Cálculo de la carga piezométrica y energía total

Enseguida se calcula la carga piezométrica y energía total en cada uno de los nudos mediante la siguiente expresión:

$$\text{Carga piezométrica} = z + \frac{p}{\rho g} \dots (8)$$

En donde

Z , Carga de posición en m

$\frac{p}{\rho g}$, Carga de presión en m

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5.11 y en la figura 5.3 la representación gráfica de los valores calculados.

Nudo Correspondiente	Carga piezométrica (msnm)	Energía total (msnm)
10	265.335	265.406
9	261.244	261.319
8	258.310	258.387
7	256.316	256.399
6	253.803	253.875
5	231.845	231.918
4	204.029	204.104
3	201.430	201.504
2	176.983	177.135
1	156.933	157.086
Tanque San Ramón	149.710	149.710
Rebombeo SAPA	112.670	112.670

Tabla 5. 11 Carga piezométrica y energía total

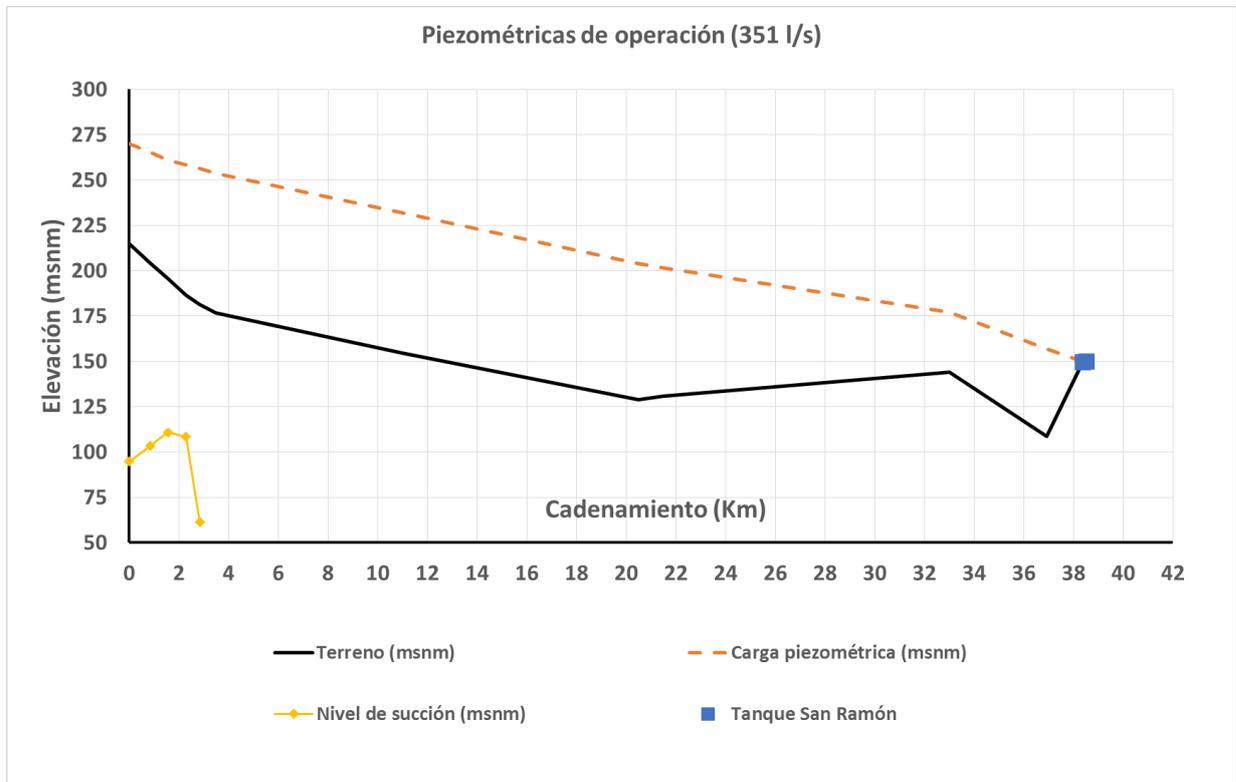


Figura 5. 3 Piezométricas a lo largo de la línea principal

5.1.7 Cálculo de la carga de bombeo

5.1.7.1 Cargas en las descargas de las bombas (msnm)

Para el cálculo de la carga de bombeo necesaria de cada uno de los pozos, sumaremos a la energía total calculada en cada nudo de la línea principal las pérdidas por fricción de cada ramal, siendo esa energía total la carga que deben de tener las bombas en su descarga.

De esta forma tenemos que:

- El nudo 10 tiene una energía total de 265.406 m , ver la tabla 5.11
- Sumaremos la pérdida por fricción del ramal que llega a ese nudo (pozo 2 línea - principal, que es de: 0.175 m , ver la tabla 5.7
- Obtenemos la carga total necesaria que necesita la bomba correspondiente al pozo 2: $265.406 \text{ msnm} + 0.175 \text{ m} = 265.581 \text{ msnm}$

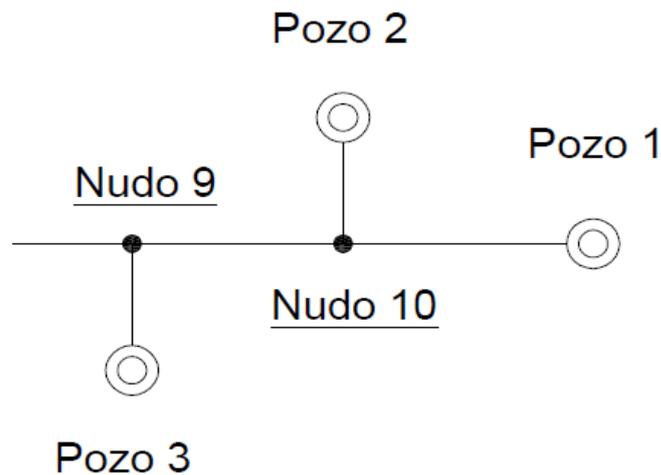


Figura 5. 4 Llegada del ramal del pozo 2 a la línea principal

En la tabla 5.12 se presentan los valores de la energía total en cada pozo y en el rebombeo SAPA.

Pozo	Carga en la descarga de las bombas (msnm)
1	270.092
2	265.581
3	261.806
4	258.662
5	256.778
SP1	115.505
SP2	115.419
Tanque	
Rebombeo SAPA	206.969

Tabla 5. 12 Carga en la descarga de cada uno de los pozos y rebombeo

5.1.7.2 Carga de bombeo (m)

A continuación se calcula la carga de bombeo necesaria para extraer de cada pozo el gasto propuesto.

La carga de bombeo en metros se calculó con el uso de la siguiente expresión

$$CB = CB_{msnm} + ND - CT \quad \dots (9)$$

En donde

CB , Carga de bombeo, en m

CB_{msnm} , Carga en la descarga de la bomba, en msnm

ND, Nivel dinámico de cada pozo , en m

CT, Cota de terreno , en msnm

Al sustituir en la ecuación 9 los niveles dinámicos (tabla 3.1), la cota del terreno (tabla 3.5) y la carga en la descarga de las bombas (tabla 5.12), se obtiene la carga de bombeo en m de cada uno de los pozos: los resultados se muestran en la tabla 5.13.

Pozo	Carga de bombeo (m)
1	175.392
2	162.301
3	150.926
4	150.332
5	195.288
SP1	101.615
SP2	98.079
Tanque	
Rebombeo SAPA	94.299

Tabla 5. 13 Carga de bombeo en metros

5.2 Análisis con gasto de operación (271 l/s)

5.2.1 Cálculo del factor de fricción

El factor de fricción para el análisis con el gasto de operación (271 l/s), se modificara en algunos tramos de la línea principal en comparación al análisis anterior realizado (351 l/s), debido a la disminución del gasto.

A continuación en la tabla 5.14 se muestra los tramos en los cuales el factor de fricción presentó alguna modificación

Tramo	Q (l/s)	Q (l/s)	D (")	L (m)	D (m)	Área (m ²)	Velocidad (m/s)	e/D (10 ⁻⁶)	Viscosidad (m ² /s) (10 ⁻⁶)	Re	f
Inc. Futura 30 l/s- Cambio de clase	0	166	18	7500	0.457	0.164	1.011	3.281	1.1	420261.203	0.014
Cambio de clase-Inc. Futura 50 l/s	0	166	18	9500	0.457	0.164	1.011	3.281E	1.1	420261.203	0.014
Inc. Futura 50 l/s- Ramal San Pedro	0	166	20	975.72	0.508	0.203	0.819	2.953	1.1	378235.083	0.014
Ramal San Pedro- Cambio de Diám.	105	271	24	11524.28	0.610	0.292	0.929	2.461	1.1	514566.805	0.013
Cambio de Diám. a Nudo 1	0	271	20	3926.67	0.508	0.203	1.337	2.953	1.1	617480.166	0.013
Nudo 1 a Tanque San Ramón	0	271	20	1444.6	0.508	0.203	1.337	2.953	1.1	617480.166	0.013

Tabla 5. 14 Cálculo del factor de fricción (gasto de operación 271 l/s)

5.2.2 Incremento en el factor de fricción

En la tabla 5.15 se muestra el incremento del 40 % al factor de fricción de los tramos de la línea principal que se modificaron debido al análisis con 271 l/s.

Tramo	f incrementado 40%
Inc. Futura 30 l/s-Cambio de clase	0.019
Cambio de clase-Inc. Futura 50 l/s	0.019
Inc. Futura 50 l/s-Ramal San Pedro	0.019
Ramal San Pedro-Cambio de Diám.	0.018
Cambio de Diám. a Nudo 1	0.018
Nudo 1 a Tanque San Ramón	0.018

Tabla 5. 15 incremento del factor de fricción (gasto de operación 271 l/s)

5.2.3 Cálculo de las pérdidas a lo largo de la conducción principal

En la tabla 5.16 se muestran las pérdidas por fricción en metros de los tramos de la línea principal que se modificaron debido al análisis con 271 l/s.

Tramo	hf (m)
Inc. Futura 30 l/s-Cambio de clase	16.221
Cambio de clase-Inc. Futura 50 l/s	20.547
Inc. Futura 50 l/s-Ramal San Pedro	1.270
Ramal San Pedro-Cambio de Diám.	15.194
Cambio de Diám. a Nudo 1	12.488
Nudo 1 a Tanque San Ramón	4.594

Tabla 5. 16 Cálculo de pérdidas (gasto de operación 271 l/s)

5.2.4 Cálculo de la carga de presión

En la tabla 5.17 se muestran los valores obtenidos de las cargas de presión de cada uno de los nudos.

Nudo Correspondiente	Carga de Posición (msnm)	Carga de velocidad (m)	Carga de Presión (m)
10	204.280	0.071	27.203
9	195.880	0.074	31.512
8	186.330	0.078	38.128
7	181.490	0.083	40.974
6	176.600	0.052	43.371
5	154.350	0.052	49.400
4	128.900	0.034	54.321
3	130.670	0.044	51.272
2	144.060	0.091	22.641
1	108.560	0.091	45.653
Tanque San Ramón	149.710	0	0
Rebombeo SAPA	112.670	0	0

Tabla 5. 17 Carga de presión de los nudos (gasto de operación 271 (l/s)

5.2.5 Cálculo de la carga piezométrica y energía total

En la tabla 5.18 se muestran las cargas piezométricas y energía total en cada uno de los nudos, en el rebombero y en tanque de destino (Tanque San Ramón). Su correspondiente representación gráfica en la figura 5.5

Nudo Correspondiente	Carga piezométrica (msnm)	Energía total (msnm)
10	231.483	231.554
9	227.392	227.467
8	224.458	224.535
7	222.464	222.547
6	219.971	220.024
5	203.750	203.802
4	183.221	183.255
3	181.942	181.986
2	166.701	166.792
1	154.213	154.304
Tanque San Ramón	149.710	149.710
Rebombero SAPA	112.670	112.670

Tabla 5. 18 Energía total en nudos (gasto de operación 271 l/s)

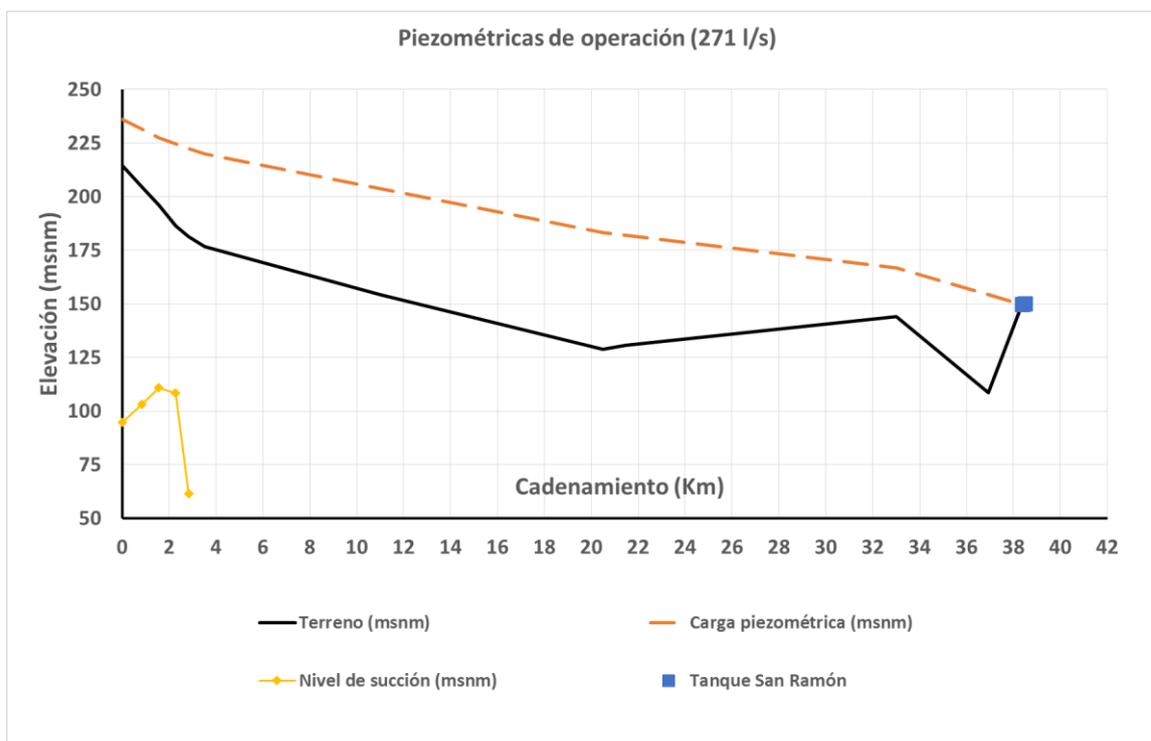


Figura 5. 5 Cargas piezométricas (271 l/s)

5.2.6 Cálculo de la carga de bombeo

5.2.6.1 Carga en la descarga de las bombas (msnm)

Pozo	Carga en la descarga de las bombas (msnm)
1	236.240
2	231.729
3	227.954
4	224.810
5	222.926
SP1	115.505
SP2	115.419
Tanque	
Rebombeo SAPA	187.450

Tabla 5. 19 Carga en la descarga de las bombas (msnm)

5.2.6.2 Carga de bombeo (m)

Al sustituir en la ecuación 9 los niveles dinámicos (tabla 3.1), la cota del terreno (tabla 3.5) y la carga en la descarga de las bombas (tabla 5.19), se obtiene la carga de bombeo en m de cada uno de los pozos: los resultados se muestran en la tabla 5.20.

En la tabla 5.20 solo deja la carga de bombeo, los otros datos están en las tablas 3.1 y 3.5.

Pozo	Cota de terreno (msnm)	Nivel dinámico (m)	Carga de bombeo (m)
1	214.7	120	141.540
2	204.28	101	128.449
3	195.88	85	117.074
4	186.33	78	116.480
5	181.49	120	161.436
SP1	104.56	90.67	101.615
SP2	108.34	91	98.079
Tanque			
Rebombeo SAPA	110.670	-	74.780

Tabla 5. 20 Carga de bombeo en m

5.3 Comparación de las cargas de bombeo

En la tabla 5.21 se muestra la comparación de las cargas de bombeo necesarias para el gasto de diseño (351 l/s) y el gasto de operación (271 l/s) respectivamente, de igual forma se indican las cargas de operación de las bombas que actualmente operan en el proyecto.

Pozo	Carga de bombeo (m) (351 l/s)	Carga de bombeo (m) (271 l/s)	Carga de bombeo existente en el proyecto (m)	Diferencia bombeo (350 vs 271 l/s)
1	175.3	141.5	197.5	33.8
2	162.3	128.5	161	33.8
3	150.9	117.1	143	33.8
4	150.3	116.5	158	33.8
5	195.2	161.4	198	33.8
SP1	101.6	101.6	109	
SP2	98.1	98.1	105	

Tabla 5. 21 Comparación de cargas de bombeo

5.4 Curvas características de las bombas

A continuación se muestran las curvas de las bombas seleccionadas en el diseño preliminar de la red, los puntos de operación para los gastos de 351 y 271 l/s y de igual forma el punto en que la bomba opera para el gasto de extracción.

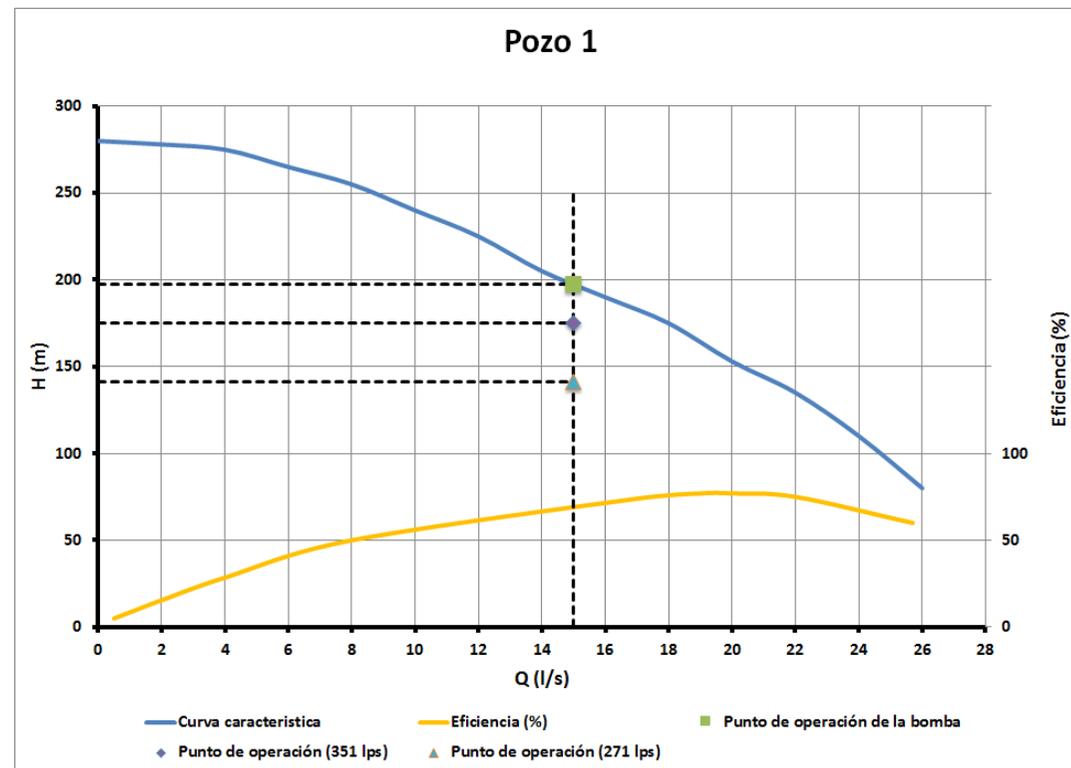


Figura 5.4. 1 Carga de bombeo 351 l/s y 271 l/s (Pozo 1)

Podemos apreciar que en el pozo 2 la carga que la bomba debe proporcionar en la operación de la red a gasto de diseño (350 l/s) es mayor que la que puede entregar la bomba.



Figura 5.4. 2 Carga de bombeo 351 l/s y 271 l/s (Pozo 2)

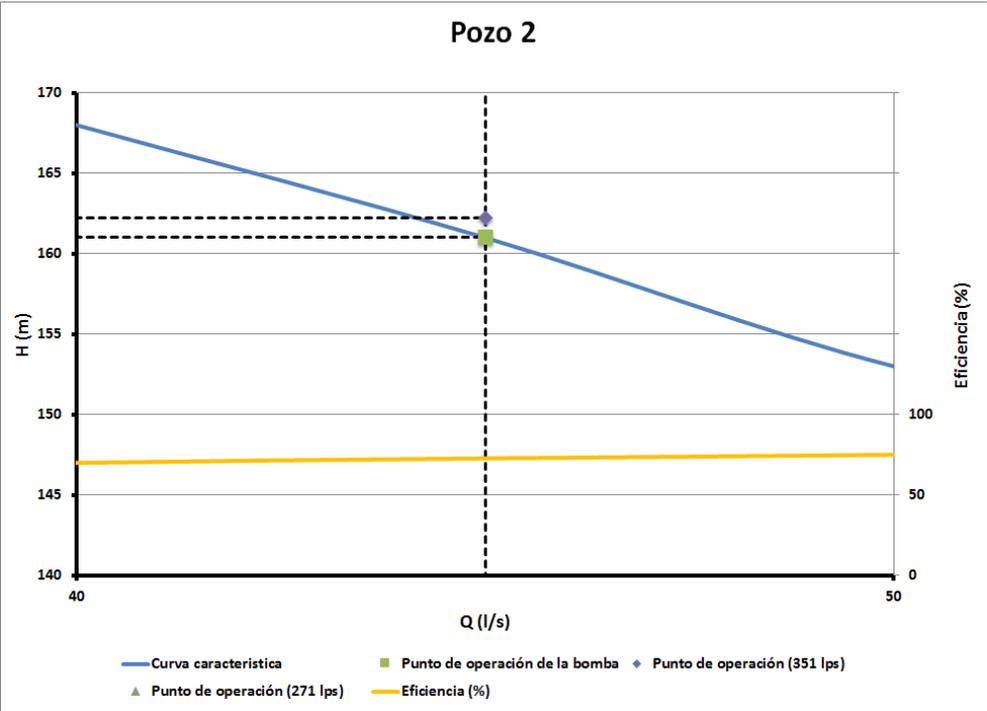


Figura 5.4. 3 Zoom a puntos de operación (pozo 2)

Podemos apreciar que en el pozo 3 la carga que la bomba debe proporcionar en la operación de la red a gasto de diseño (350 l/s) es mayor que la que puede entregar la bomba.

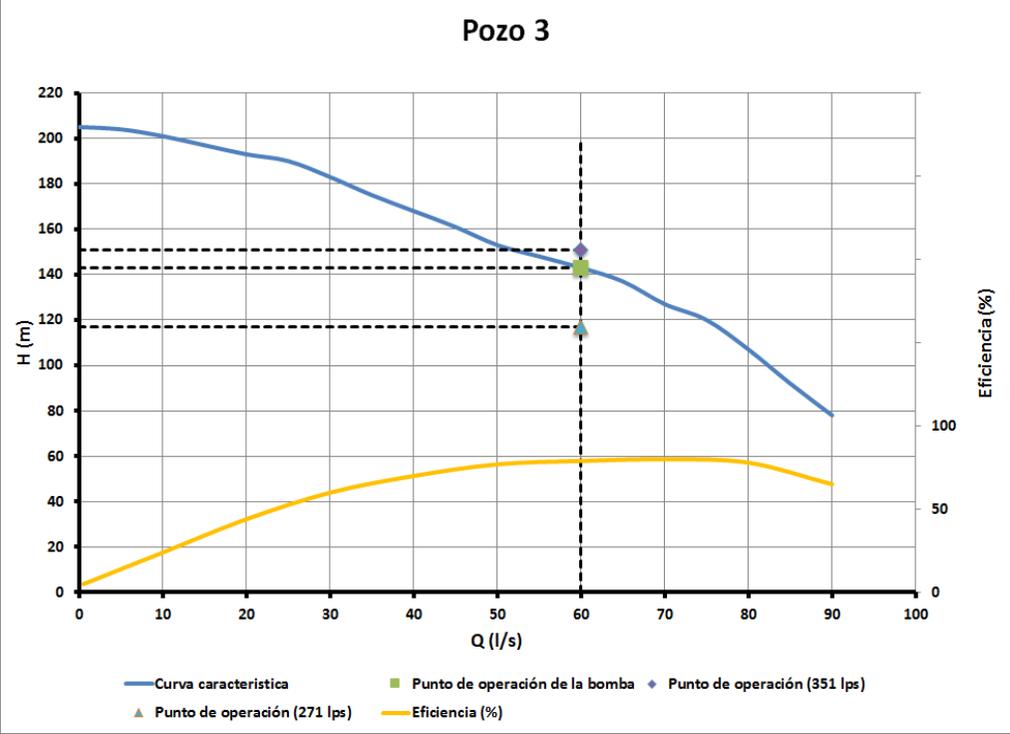


Figura 5.4. 5 Carga de bombeo 351 l/s y 271 l/s (Pozo 3)

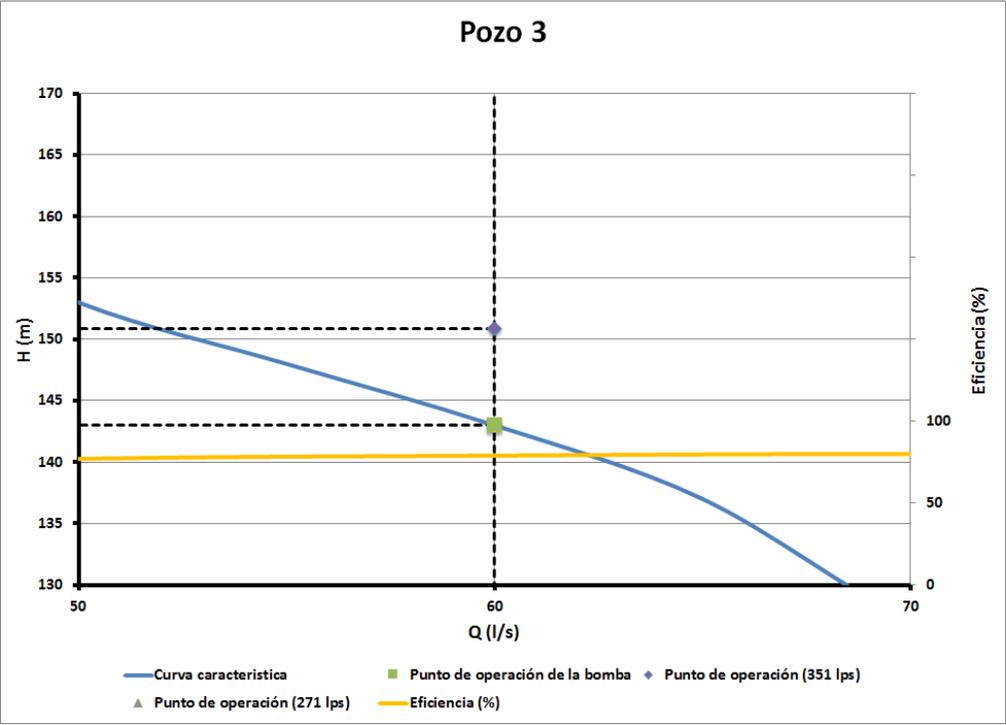


Figura 5.4. 4 Zoom a puntos de operación (pozo 3)

En la figura 5.4.6 se muestran los puntos de operación para los gastos de 351 y 271 l/s y de igual forma el punto en que la bomba opera para el gasto de extracción del pozo 4.

Podemos apreciar que la bomba suministra la carga necesaria para la carga calculada.

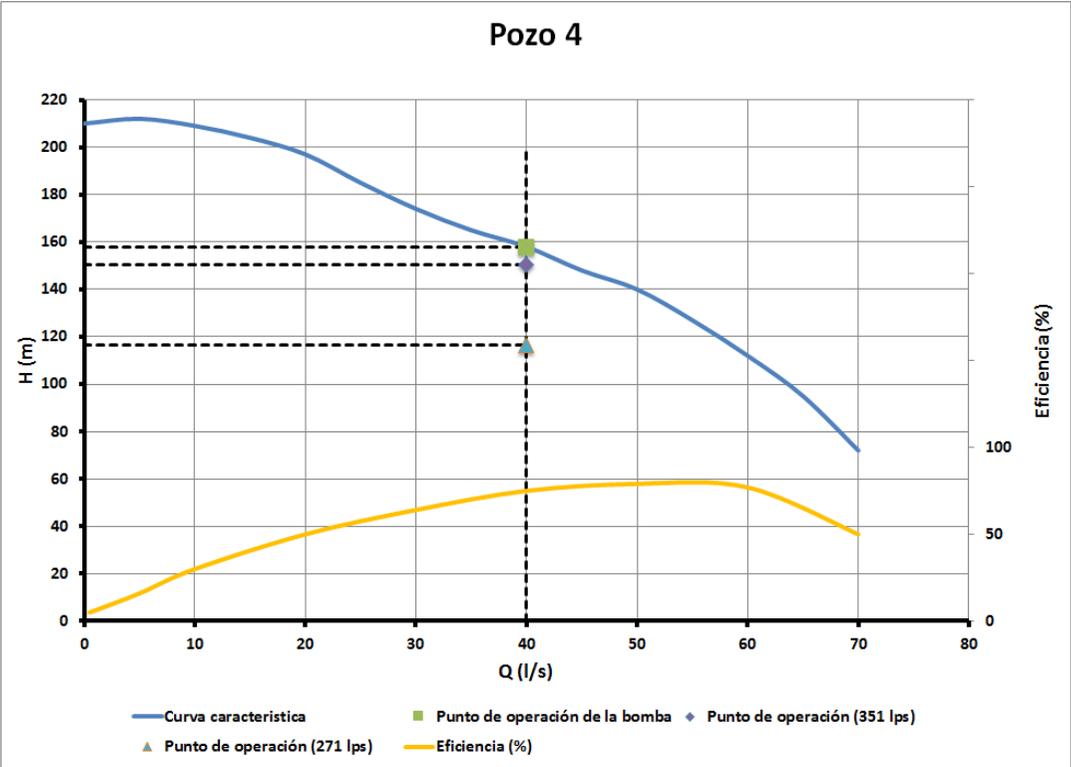


Figura 5.4.6 Carga de bombeo 351 l/s y 271 l/s (Pozo 4)

En la figura 5.4.7 observamos las características de las bomba para el pozo 5, podemos apreciar que la carga que ofrece la bomba es suficiente para la demanda de diseño de 351 l/s.

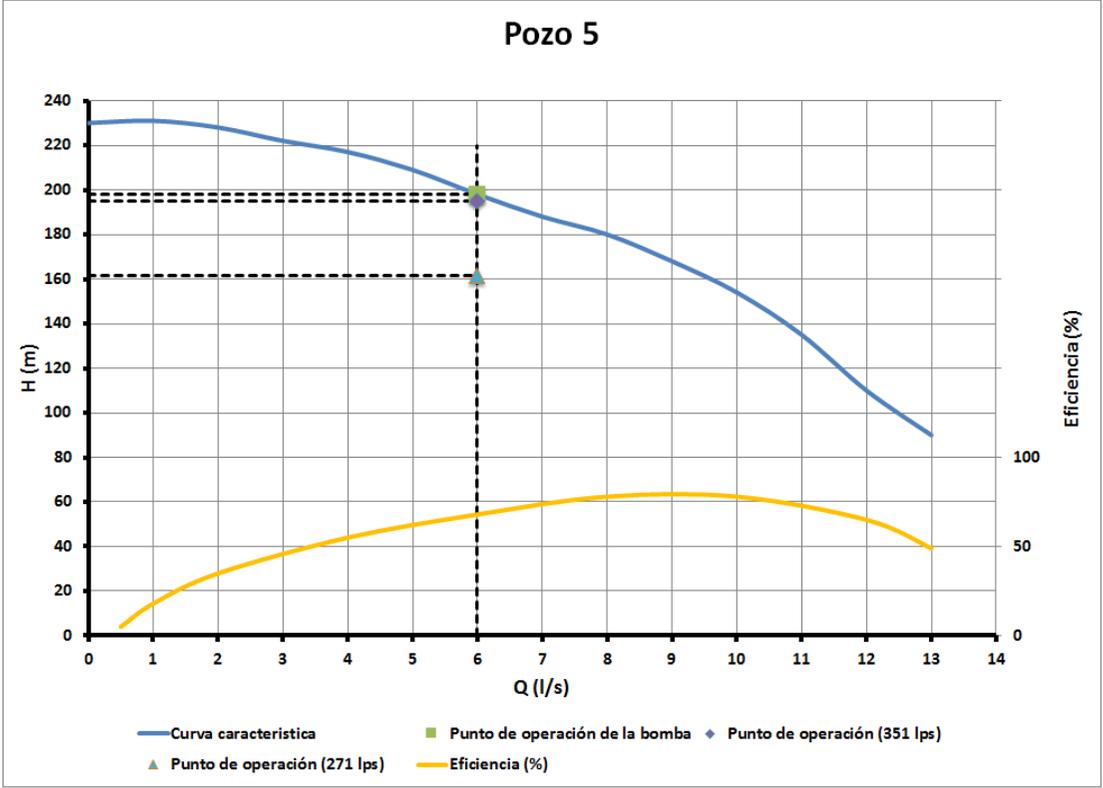


Figura 5.4. 7 Carga de bombeo 351 l/s y 271 l/s (Pozo 5)

En la figura 5.4.8 observamos las características de la bomba para el pozo SP1, podemos apreciar que la carga que ofrece la bomba es suficiente para la demanda de diseño de 351 y 271 l/s , siendo la carga de bombeo para ambas revisiones la misma (101.6 m).

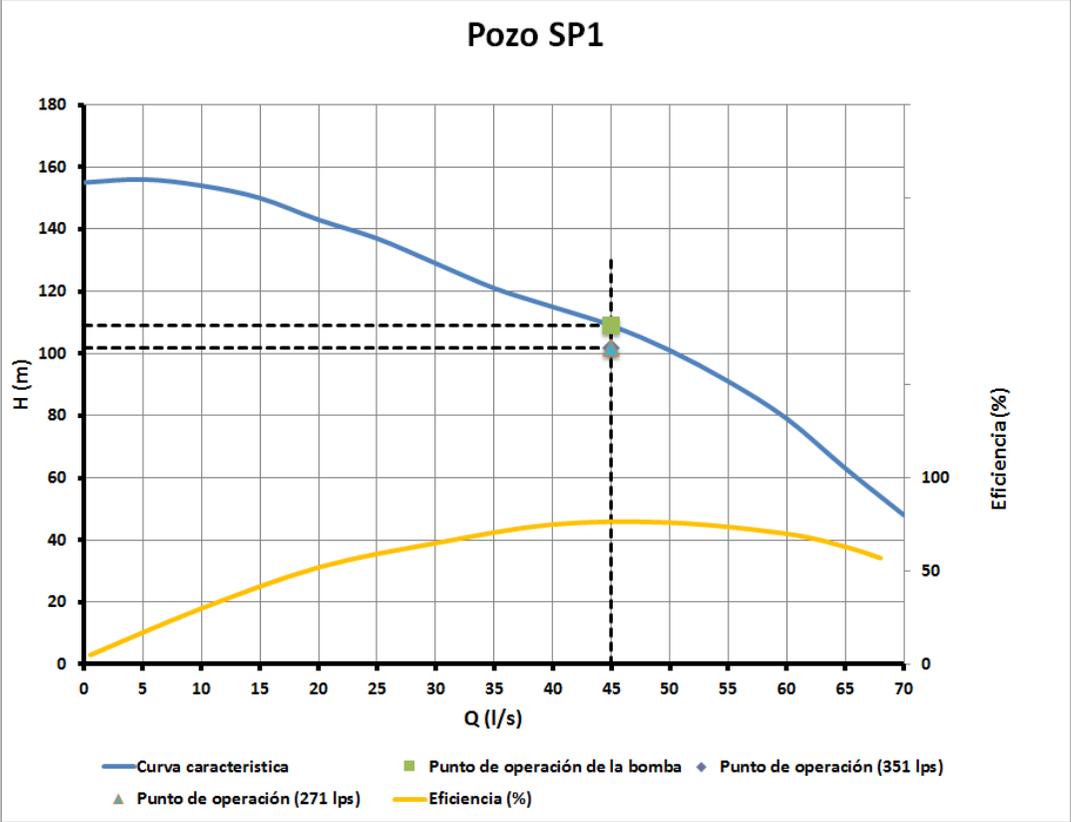


Figura 5.4. 8 Carga de bombeo 351 l/s y 271 l/s (Pozo SP1)

En la figura 5.4.9 observamos las características de la bomba para el pozo SP1, podemos apreciar que la carga que ofrece la bomba es suficiente para la demanda de diseño de 351 y 271 l/s , siendo la carga de bombeo para ambas revisiones la misma (98.1 m).

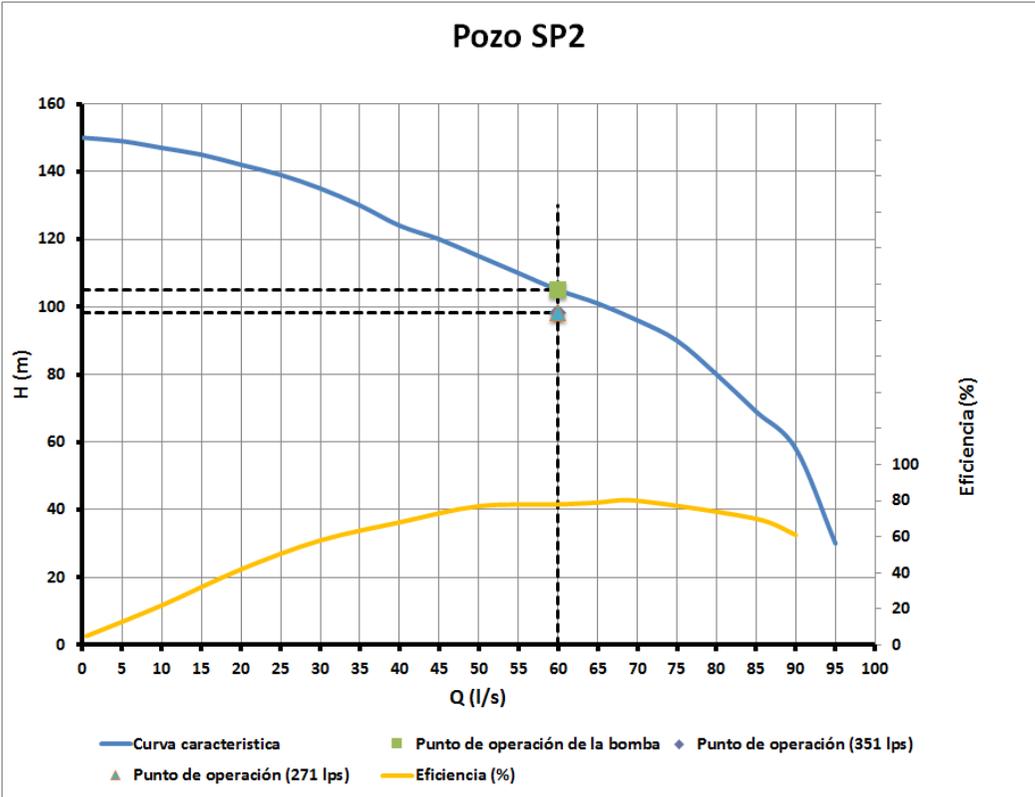


Figura 5.4. 9 Carga de bombeo 351 l/s y 271 l/s (Pozo SP2)

En la tabla 5.22 se indican las cargas de operación para los respectivos gastos, así como la carga que le faltó a la bomba para cumplir con la demanda de 351 l/s.

Pozo	Carga de bombeo (m) (351 l/s)	Carga de operación de la bomba (m)	Carga faltante de la bomba (m)
2	162.301	161.0	1.301
3	150.926	143.0	7.926

Tabla 5. 22 Carga faltante del equipo de bombeo

6 Conclusión

El sistema está diseñado para operar con 351 l/s la revisión y análisis se hizo para dicho gasto, pero de igual forma se revisó el funcionamiento con gasto parcial (271 l/s).

Mediante la comparación de las cargas de bombeo de los dos casos anteriormente mencionados (351 l/s y 271 l/s), se observan cargas superiores cuando el sistema opera con un gasto de 351 l/s siendo las diferencias de 33.8 metros en la carga de bombeo de los pozos 1 a 5. Los pozos de SP1 y SP2 no presentan diferencias.

La recomendación para ambas revisiones (gasto de diseño (351 l/s) gasto de operación (271 l/s)) sería estrangular, aunque la eficiencia no sea la mayor, ya que posteriormente habrá incorporaciones que aumentarán el gasto en algunos tramos de tubería de la sección principal y el equipo de bombeo debe de ser capaz de cumplir las demandas.

Las bombas correspondientes a los pozos 2 y 3 no proporcionan la carga necesaria para la operación con el gasto de diseño (351 l/s), por lo cual deben de remplazarse dichos equipos.

Finalmente se concluye que el proyecto debe de cumplir las demandas establecidas por el gasto de diseño, con la cual se dan los valores de pérdidas en metros que cada equipo debe de tener para el funcionamiento adecuado cuando el sistema trabaje a gasto parcial.

En la tabla 6.1 se indica el exceso de energía en los equipos de bombeo cuando el sistema opera con un gasto de 351 l/s, en los pozos 2 y 3 la carga de bombeo necesaria es mayor en comparación a la carga de operación de la bomba en 1.3 y 7.9 metros respectivamente. Ver tabla 5.22.

Pozo	Exceso de energía (m)
1	22.108
4	7.668
5	2.712
SP1	7.385
SP2	6.921

Tabla 6. 1 Exceso de energía en equipos de bombeo (351 l/s)

En la tabla 6.2 se indica el exceso de energía en los equipos de bombeo cuando el sistema opera con un gasto de 271 l/s.

Pozo	Exceso de energía (m)
1	55.960
2	32.551
3	25.926
4	41.520
5	36.564
SP1	7.385
SP2	6.921

Tabla 6. 2 Exceso de energía en equipos de bombeo (271 l/s)

7 Referencias

Sotelo, Á. Gilberto, Hidráulica General, Vol. 1 Fundamentos, México, Editorial Limusa, 2009.