

MODERNIZACIÓN SISTEMA DE BOMBEO “LA PICACITA”



Cordoba, Rodrigo Martin

PROYECTO INTEGRADOR PROFESIONAL

Ante la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del
Comahue para acceder al título de

Ingeniero Mecánico

Año 2024

MODERNIZACIÓN SISTEMA DE BOMBEO “LA PICACITA”

CORDOBA, Rodrigo Martín

Director: **Ing. MARCHEGANI, Ariel**

Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del
Comahue como requisito para la obtención del grado de
INGENIERO MECÁNICO

Neuquén - Argentina

AÑO 2024

MODERNIZACIÓN SISTEMA DE BOMBEO “LA PICACITA”

CORDOBA, Rodrigo Martín

Aprobado en Diciembre de 2024.

Tribunal evaluador:

Mg. Ing. KEIL, Germán

Mg. Ing. AUDISIO, Orlando

Ing. MESQUIDA, César

Este Proyecto está Dedicado a:

Mis hijos, Pedro y Bruno, que fueron la motivación para seguir adelante siempre.

Gabi que con cariño supo acompañarme hasta el final.

Mis padres, Raúl y María Liz, que me apoyaron todos estos años.

Mis hermanos Diego, Gonzalo, Mariángeles y Ramiro.

Mi abuela Telvi Tisot.

AGRADECIMIENTOS

Sin lugar a dudas, la parte más difícil del proyecto es y será completar estas líneas, que como corresponde dejé para último lugar. El aporte que ha hecho cada una de las personas con las que compartí a lo largo de estos años me ha formado como persona además como profesional.

El hecho de haber llegado a la meta corresponde a un esfuerzo conjunto de muchas personas dentro la institución y a las cuales les estaré eternamente agradecido.

En primer lugar, decir gracias a Ariel Marchegiani, que además de acompañarme en este proyecto, muchas veces hizo de mentor escribiéndome para que no bajara los brazos. También a Orlando Audisio que, en conjunto con Ariel, supieron abrirme las puertas del LaMHi para no perder vinculación con la institución.

A Mónica Zalazar que, sin saberlo, y gracias a permitirme cursar el Curso de Inspector de Soldadura, me permitió seguir en contacto con la Universidad.

A German Musso, Martin Quesada y Darío Melo, por permitirme realizar las inspecciones que necesitara en el sistema bombeo.

A todos mis seres queridos que supieron entender mis ausencias.

A la Universidad Nacional del Comahue que en sus aulas y pasillos pude formarme.

El esfuerzo en conjunto de todos hizo posible que concluya mis estudios.

MODERNIZACIÓN SISTEMA DE BOMBEO “LA PICACITA”

Autor: CORDOBA, Rodrigo Martín

Director: Ing. MARCHEGANI, Ariel

RESUMEN

El presente Proyecto Integrador Profesional (PIP) tuvo por finalidad resolver una problemática concreta en un sistema de bombeo utilizado para riego en el interior de la provincia de Neuquén, el cual no proveía el caudal necesario y al finalizar cada temporada las bombas presentaban un deterioro excesivo.

Con base en las necesidades insatisfechas comunicadas por los operarios y productores, se describieron y detallaron las fallas.

El desarrollo inicia con una inspección de las instalaciones, para de esta manera identificar todos los componentes. Se relavaron equipos y documentación desarrollada a lo largo de 20 años de operación. Con esta información se confeccionaron las curvas del sistema para una y tres bombas funcionando en simultaneo. Dado que no existe información sobre los equipos de bombeo, a partir de bombas semejantes construidas por el mismo fabricante se construyeron las curvas H-Q, las que en conjunto con las curvas del sistema se utilizaron para describir el funcionamiento de la estación.

En el caso del análisis sobre el deterioro en los rodetes, la metodología utilizada fue la de realizar una inspección crítica sobre los equipos para a posteriori, según la morfología y ubicación del daño, identificar los fenómenos que lo causaban. De esto último se pudo identificar que el fenómeno causante del daño era CAVITACIÓN. Se centró el análisis en el lugar donde se concentraba el daño y dados los parámetros operativos, el caudal en este caso, se determinó que al encender todas las bombas al mismo tiempo se generaba un contra flujo o flujo en reversa que producía zonas de baja presión. Además, y dada la presencia de arena, se demostró como ésta aporta núcleos de cavitación y en conjunto con una zona de baja presión se produce el fenómeno de cavitación. Se describió como la sinergia entre cavitación y presencia de partículas abrasivas genera un efecto multiplicador en el daño.

En resumen, el Proyecto identificó las causas del deterioro del sistema, brindó propuestas concretas para mitigarlo y ofreció una propuesta de modernización del sistema manteniendo la mayor parte de las instalaciones.

Palabras Clave:

Bombas Centrífugas – Curvas del Sistema – Cavitación – Performance – Punto de Funcionamiento – Sinergia.

“LA PICACITA” PUMPING SYSTEM UPGRADE

Author: CORDOBA, Rodrigo Martín

Advisor: Ing. MARCHEGANI, Ariel

ABSTRACT

The purpose of this Professional Integration Project (PIP) was to solve a specific problem in a pumping system used for irrigation in the interior of the province of Neuquén, which did not provide the necessary flow and at the end of each season the impellers showed excessive deterioration.

Based on the unmet needs communicated by operators and producers, the failures were described and detailed.

The development begins with a critical inspection of the facilities, in order to identify all the components. Next, the equipment and documentation developed over 20 years of operation were reviewed. With this information, the system curves were built for one and three pumps operating simultaneously. Since there is no information on the pumping equipment, the H-Q curves were constructed from similar pumps built by the same manufacturer, which, together with the system curves, were used to describe the operation of the station.

In the case of the analysis of the deterioration in the impellers, the methodology used was to carry out a critical inspection of the equipment to subsequently, according to the morphology and location of the damage, identify the phenomena that caused it. From the latter, it was possible to identify that the phenomenon causing the damage was CAVITATION, but since there was no data from the pump, $NPSH_r$, other variables that could cause cavitation in the impeller were analyzed. The analysis was focused on the place where the damage was concentrated and given the operating parameters, the flow in this case, it was concluded that turning on all the pumps at the same time generated a counter flow or reverse flow that produced low pressure areas. Furthermore, and given the presence of sand, it was concluded that it provides the cavitation nuclei and together with a low pressure's zone, the cavitation phenomenon occurs. It was described how the synergy between cavitation and the presence of abrasive particles generates a multiplying effect on the damage.

In summary, the Project identified the causes of the system's deterioration, provided concrete proposals to mitigate it, and offered a proposal to modernize the system while maintaining most of the facilities.

Key Words:

Centrifugal Pumps – System Curves – Cavitation – Performance – Operating Point – Synergy

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT.....	viii
NOMENCLATURA EMPLEADA.....	xiv
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
3. MARCO TEÓRICO.....	3
3.1. Ecuación Fundamental de la Hidrodinámica	3
3.2. Capa Límite	5
3.2.1. Descripción del Fenómeno	5
3.2.2. Pérdidas de Carga en Tuberías (Pérdidas Distribuidas)	6
3.2.3. Pérdidas de Carga en Accesorios (Pérdidas Localizadas)	7
3.3. Curva del Sistema	7
3.4. Bomba Centrífuga (Rotodinámica).....	8
3.4.1. Clasificación de las Bombas Hidráulicas	8
3.4.2. Elementos Constitutivos de las Bombas Rotodinámicas.....	9
3.4.3. Principio de Funcionamiento de una Bomba Centrífuga (Rotodinámica).....	10
3.4.4. Curvas Características de las Bombas	13
3.5. Velocidad Específica	14
3.6. Funcionamiento de Bombas en Paralelo.....	14
3.7. Cavitación	16
3.7.1. Descripción del Fenómeno	16
3.7.2. Parámetros de Cavitación	16
3.7.3. Como Determinar la presencia de Cavitación	18
4. RELEVAMIENTO DE LA ESTACIÓN DE BOMBEO	20
4.1. Descripción General del Sistema	20
4.2. Relevamiento de las Instalaciones	20
4.3. Relevamiento de los Equipos.....	24
4.3.1. Relevamiento de Daño en Impulsores	26
4.3.2. Medición de Caudal.....	28
4.4. Curva Característica de la Bomba.....	31

4.4.1.	Análisis de Bombas de la firma Ideal	31
4.4.2.	Curvas del Sistema	34
5.	IDENTIFICACIÓN DE FALLAS	37
5.1.	Deficiencias del Sistema de Bombeo.....	37
5.2.	Análisis de Fallas	38
6.	ANÁLISIS DE CAVITACIÓN	39
6.1.	Análisis Morfológico	39
6.2.	Identificación del Origen de la Cavitación	42
6.3.	Comparación entre parámetros de la estación de Bombeo La Picacita y el origen de la Cavitación	45
7.	ANÁLISIS DEL DESGASTE ABRASIVO POR LA PRESENCIA DE ARENA EN EL FLUJO 47	
8.	SINERGÍA ENTRE CAVITACIÓN Y PRESENCIA DE PARTÍCULAS ABRASIVAS	49
8.1.	Descripción del Fenómeno Microscópico	49
8.2.	Análisis Macroscópico de la Sinergia.....	53
8.3.	Conclusión de la Sinergia	53
9.	ANÁLISIS DE TAREAS DE MANTENIMIENTO.....	54
9.1.	Descripción de la Gestión Actual de Mantenimiento	54
10.	ESTADO ACTUAL Y PROPUESTAS DE MEJORA DEL SISTEMA.....	56
10.1.	Estado Actual.....	56
10.2.	Propuesta de Modernización del Sistema	57
11.	CONCLUSIONES	61
	ANEXOS.....	62
A.1.	Propiedades de Fluidos.....	63
A.2.	Gráficos y Tablas para Calcular Pérdidas en Tuberías y Accesorios	64
A.3.	Desarrollo de la Curva de la Bomba CPN 400-400	69
A.4.	Informe de Aforo realizado por EVARSA	72
A.5.	Desarrollo de Curvas del Sistema	78
A.5.1.	Curva de Sistema para la Bomba III en funcionamiento.....	78
A.5.2.	Curva del Sistema para la Todas las Bombas en funcionamiento	80
	REFERENCIAS	83

INDICE DE IMAGENES

<i>Imagen 1 - Ubicación Central de Bombeo “La Picacita”, (Google Earth)</i>	<i>1</i>
<i>Imagen 2 - Estado de Impulsores luego de la temporada 2016.....</i>	<i>2</i>
<i>Imagen 3 - Volumen de Control, [2]</i>	<i>3</i>
<i>Imagen 4 - Capa Límite (David López Pérez, 2015)</i>	<i>6</i>
<i>Imagen 5 - Despiece Bomba Centrífuga [16].....</i>	<i>9</i>
<i>Imagen 6 - Trayectorias absoluta y relativa de una partícula de fluido que atraviesa el rodete de una bomba [15]</i>	<i>11</i>
<i>Imagen 7- Triángulos de Velocidades en una Bomba Centrífuga [15].....</i>	<i>11</i>
<i>Imagen 8 - Punto de Funcionamiento, [13].....</i>	<i>13</i>
<i>Imagen 9 - Curvas de Sistema de Bombeo con dos Bombas en Paralelo [2].....</i>	<i>15</i>
<i>Imagen 10 - Esquema de Implosión de Burbujas (https://www.slurryflo.com/cavitation)</i>	<i>16</i>
<i>Imagen 11 - Altura Neta vs NPSH_d. Criterio NPSH₃%. [11].....</i>	<i>18</i>
<i>Imagen 12 - Presencia de Cavitación en función del NPSH_d [11].....</i>	<i>19</i>
<i>Imagen 13 - Obra de Toma Central de Bombeo “La Picacita” Junio 2019</i>	<i>20</i>
<i>Imagen 14 - Cámara de Carga de Bombas.....</i>	<i>21</i>
<i>Imagen 15 - Plano Succión de Bombas.....</i>	<i>21</i>
<i>Imagen 16 - Vista en Planta Central de Bombeo.....</i>	<i>22</i>
<i>Imagen 17 - Vista Cámara de Descarga</i>	<i>23</i>
<i>Imagen 18 - Vista en Corte Cámara de Descarga.....</i>	<i>23</i>
<i>Imagen 19 - Tablero de Medidores.....</i>	<i>24</i>
<i>Imagen 20 - Chapa de Bomba Centrífuga</i>	<i>24</i>
<i>Imagen 21 - Manómetros.....</i>	<i>25</i>
<i>Imagen 22 - Placa de Motor Bomba.....</i>	<i>25</i>
<i>Imagen 23 - Esquema de Celdas para la adquisición de Datos de Caudal, A.4.....</i>	<i>30</i>
<i>Imagen 24 - Carta de Performance Bombas CPH Ideal (https://www.bombasideal.com/)</i>	<i>32</i>
<i>Imagen 25 - Curvas de Bombas Analizadas (https://www.bombasideal.com/)</i>	<i>32</i>
<i>Imagen 26 - Curvas Bomba CPN 400-400.....</i>	<i>33</i>

<i>Imagen 27 - Curva del Sistema y Curvas Características para tres bombas</i>	<i>35</i>
<i>Imagen 28 - Relevamiento de Descargas de Rodetes</i>	<i>39</i>
<i>Imagen 29 - Relevamiento de Admisión de Rodetes</i>	<i>40</i>
<i>Imagen 30 - Ubicación del Daño (corte transversal) [1].....</i>	<i>40</i>
<i>Imagen 31 - Ubicación del Daño (corte longitudinal) [1]</i>	<i>40</i>
<i>Imagen 32 - Daño por Cavitación en rodete arenado</i>	<i>41</i>
<i>Imagen 33 - Ubicación Daño por Cavitación Detallado por Gülich [1].....</i>	<i>41</i>
<i>Imagen 34 - Borde de Ataque de la Pala [1].....</i>	<i>43</i>
<i>Imagen 35 - Flujo en Reversa o Contraflujo, página 166 [4]</i>	<i>44</i>
<i>Imagen 36 - Daño por Presencia de Partículas Abrasivas en la Voluta</i>	<i>47</i>
<i>Imagen 37 - Daño por Presencia de Partículas Abrasivas en la Voluta</i>	<i>47</i>
<i>Imagen 38 - Daño por Presencia de Partículas Abrasivas en el Rodete</i>	<i>48</i>
<i>Imagen 39 - Formación de Burbuja a partir de una Partícula Sólida Aislada, [10, p5]</i>	<i>50</i>
<i>Imagen 40 - Movimiento de la Partícula a Causa de la Burbuja, [10, p10].....</i>	<i>52</i>
<i>Imagen 41 - Movimiento de la Partícula a Causa del Colapso la Burbuja, [10, p10]</i>	<i>52</i>
<i>Imagen 42 - Selección de Bombas, Select. Wilo</i>	<i>58</i>
<i>Imagen 43 - Curvas de Bombas, Select. Wilo</i>	<i>59</i>
<i>Imagen 44 - Curvas de Bombas CPH 500-650 y CPN 400-400.....</i>	<i>70</i>
<i>Imagen 45 - Curvas de Bombas CPN 400-400 en paralelo</i>	<i>71</i>

NOMENCLATURA EMPLEADA

D	Diámetro
H_B	Altura Bruta
H_N	Altura Neta
H_r	Pérdida por Rozamiento
H_{rp}	Pérdida de Carga Primaria
H_{rs}	Pérdida de Carga Secundaria
H_u	Altura Útil
$NPSH$	Altura Neta de Succión
$NPSH_i$	Punto de Comienzo de Cavitación, Punto de Incepción
Q	Caudal Volumétrico
Q_{cr}	Caudal Crítico
Q_n	Caudal Nominal
Q_{SF}	Caudal Sin Choque
c	Velocidad Absoluta del Fluido
g	Aceleración de la Gravedad
i_1	Angulo de Incidencia
l	Largo
n_s	Velocidad Específica, Número Especifico de Revoluciones
p	Presión
p_v	Presión de Vapor
u	Velocidad Tangencial

w	Velocidad Relativa
β_1	Ángulo en entrada del flujo de agua a la pala
β_{1B}	Ángulo de la directriz de la pala con respecto a la velocidad tangencial
\emptyset	Diámetro
η	Viscosidad Dinámica
λ	Coefficiente de pérdidas primarias
ρ	Densidad Absoluta
ζ	Coefficiente Adimensional de Pérdida Secundaria
τ	Esfuerzo Cortante

1. INTRODUCCIÓN

El sistema de riego “La Picacita”, provee de agua para riego a la localidad de Picún Leufú por medio de un canal que toma agua del río Limay (*Imagen 1 – Ubicación Central de Bombeo “La Picacita”*). Hay una zona del sistema que queda fuera del dominio del canal principal por su altura. Esta zona se riega por medio de dos bocatoma sobre el arroyo Picún Leufú (denominadas bocatoma de Margen Derecha y bocatoma de Margen Izquierda). Cuando el caudal del arroyo disminuye se bombea agua desde el canal principal por medio de una estación de bombeo. Se riegan aproximadamente 1600 ha, predominando el cultivo de la alfalfa para enfardado, para lo cual según está pactado entre la Subsecretaría de Recursos Hídricos y los productores, se necesita una provisión de 1 m³/s de agua. La central de bombeo, trasvasa el agua desde el canal principal al canal secundario de riego. La operación y mantenimiento del canal principal y la sala de bombeo están a cargo de la Sub Secretaría de Recursos Hídricos, que cuenta con 10 operarios y una administrativa en el lugar.



Imagen 1 - Ubicación Central de Bombeo “La Picacita”, (Google Earth)

Hace más dos décadas dicha central de bombeo opera sin un plan de mantenimiento registrado, esto implica que no existen un procedimiento a seguir para identificar, intervenir y registrar las acciones en los equipos; y solo se realizan tareas de mantenimiento correctivo cuando la central de bombeo no está operando, esto es entre los meses de Mayo y Septiembre.

Desde 2014 los productores de la región reiteran su insatisfacción por la cantidad de agua suministrada al canal secundario. Es por esto, que en 2017 se solicitó a la empresa EVARSA realizar un aforo en el canal secundario donde descarga la impulsión, dando como resultado casi un 15% menos del caudal esperando. En este contexto, nace como necesidad de la Subsecretaría

de Recursos Hídricos, establecer acciones para garantizar la dotación de agua necesaria a los productores.

Hacia fines de 2018 durante las tareas de mantenimiento, fue muy complejo y problemático el balanceo de los impulsores luego del rellenado y mecanizado de los mismos. Cabe señalar que dicho procedimiento, que se lleva a cabo todos los años, resultando de vital necesidad dada la constante pérdida de material de los alabes (ver *Imagen 2 – Estado de Impulsores luego de la temporada 2016*). Como consecuencia de esta situación, desde la Dirección Provincial Técnica y Planificación, se impulsaron acciones para garantizar el caudal a los productores, ya mediante la compra de nuevas bombas o realizar un overhaul sobre los equipos actuales. A tal fin fue necesario el análisis de las instalaciones y de los equipos para determinar el motivo de su deterioro, determinar que equipos hay que adquirir o las reparaciones a realizar, que modificaciones hay que realizar en la instalación de toma de impulsión y/o que ajustes en la operación se deben formalizar.



Imagen 2 - Estado de Impulsores luego de la temporada 2016

2. OBJETIVOS

Realizar un análisis del sistema de bombeo existente, a fin de relevar los problemas presentes, para posteriormente, realizar el rediseño del mismo (parcial o total).

Se pretende proponer una serie de mejoras y/o modificaciones al sistema que tiendan a optimizar el funcionamiento del mismo. Las propuestas serán integrales, abarcando no solo, los equipamientos electromecánicos, sino eventuales mejoras en las obras civiles del sistema de bombeo.

Además, realizar las Especificaciones Técnicas para la adquisición, de corresponder, de nuevos equipos de bombeo y/o todos los equipos y elementos para realizar las modificaciones propuestas en el sistema de aspiración/impulsión.

3. MARCO TEÓRICO

Como instancia previa al desarrollo del trabajo propuesto, se consideró necesario consolidar, profundizar, en relación a determinados conocimientos asociados a las temáticas abordar. Entre los mismos se tienen aspectos vinculados al comportamiento del agua fenómenos transitorios, y que se presentan a continuación a modo de síntesis.

3.1. Ecuación Fundamental de la Hidrodinámica

Esta ecuación es, sin lugar a dudas una poderosa herramienta para analizar la evolución de un fluido en una línea de corriente.

Para llegar a una expresión de ella que nos sea útil en el análisis de un sistema de bombeo, partiremos de la Primera Ley de la Termodinámica y el Teorema de Transporte de Reynolds sobre un Volumen de Control:

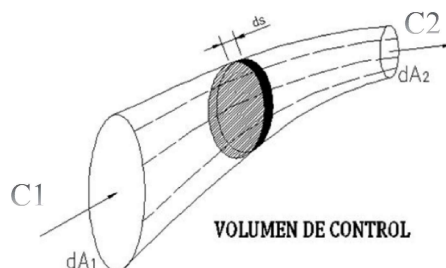


Imagen 3 - Volumen de Control, [2]

La Ley de Conservación de la Energía o Primer Principio de la Termodinámica, establece que la variación de energía del volumen de control en función del tiempo, es igual a la suma del flujo calórico más el flujo de energía en forma de trabajo que atraviesa su frontera, más la variación de energía del caudal entre la salida y la entrada, esto es:

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} = \frac{dE}{dt} = \dot{m}_1 \left(u + \frac{c^2}{2} + gz \right) - \dot{m}_2 \left(u + \frac{c^2}{2} + gz \right)$$

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_1 - \dot{m}_2$$

Dónde:

$\frac{dE}{dt}$: Variación de Energía del Volumen de Control en función del tiempo;

$\frac{dm}{dt}$: Variación de Masa en función del tiempo;

\dot{Q} : Flujo Calórico;

\dot{W} : Flujo de Trabajo;

\dot{m}_i : Caudal Másico en la sección i;

p_i : Presión de la partícula de Fluido en el punto i;

z_i : Altura Geodésica de la partícula de Fluido en el punto i;

c_i : Velocidad de la partícula de Fluido en el Punto i;

Utilizaremos la siguientes Hipótesis:

- Fluido Incompresible;
- No existe variación de energía interna, $\Delta u = 0$;
- Régimen Permanente;

$$0 = \dot{m}_1 - \dot{m}_2$$

Finalmente, la ecuación generalizada será:

$$-\sum H_r + \sum H_B + \frac{p_1}{g\rho} + \frac{\bar{c}_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{g\rho} + \frac{\bar{c}_2^2}{2g} + z_2 \quad (1)$$

3.2. Capa Límite

3.2.1. Descripción del Fenómeno

Para entender este fenómeno, debemos estudiar la distribución de velocidades a través de la normal a la superficie en un punto **A** (*Imagen 4 – Capa Límite*). Si aproximamos un tubo de Prandtl muy cerca del punto **A**, se mide la velocidad c . “Macroscópicamente” c es la velocidad del fluido en el punto **A**. Sin embargo, sabemos que, a causa de la viscosidad, la velocidad del fluido en el punto **A** es 0. Una observación más detallada nos revela que existe una distribución de velocidad en una película muy fina (*capa límite*).

Esto se explica debido a que la capa contigua a la superficie se adhiere a ella, debido a efectos de la viscosidad, y luego la velocidad aumenta rápidamente hasta que atraviesa el espesor de esa película, hasta llegar a una velocidad constante del fluido. El esfuerzo cortante en esta fina película puede describirse por la ecuación de Newton:

$$\tau = \eta \frac{dc}{dy} \quad (2)$$

El agua posee una viscosidad muy baja, por lo tanto, el espesor de esta película muy fino, por este motivo el gradiente de velocidades es muy grande, razón por la cual el esfuerzo cortante es muy grande. La resistencia generada por este fenómeno se denomina **Resistencia de Superficie**.

Fuera de esta capa límite, un líquido de baja viscosidad como el agua, se comporta como un fluido ideal.

El espesor de la capa límite (frontera de la capa límite) δ , suele definirse como la distancia desde la superficie al punto en que la velocidad difiere de la velocidad correspondiente del fluido ideal en uno por ciento.

El espesor de la capa límite aumenta conforme nos alejamos del borde de ataque, lo que se explica por la desaceleración que sufre el fluido a causa del esfuerzo cortante.

Si además, el canal por donde fluye es divergente, la presión aumenta en dirección de la corriente y el gradiente de presiones se opone al movimiento y tiende a retardar el flujo, con lo que se suma este efecto al efecto desacelerador producido por el esfuerzo cortante. Entonces la capa límite se separa del contorno. Punto **B** en la *Imagen 4 – Capa Límite*, en este punto la velocidad es cero, al igual que el punto **A**. La forma del contorno exige que la velocidad siga disminuyendo, porque el contorno diverge; pero como esto es imposible el flujo se separa del contorno al mismo tiempo que se produce un contraflujo producido por el gradiente de presiones adverso. Aguas debajo del punto **B** se crea una zona de baja presión. Este fenómeno da origen a la **Resistencia de Forma**.

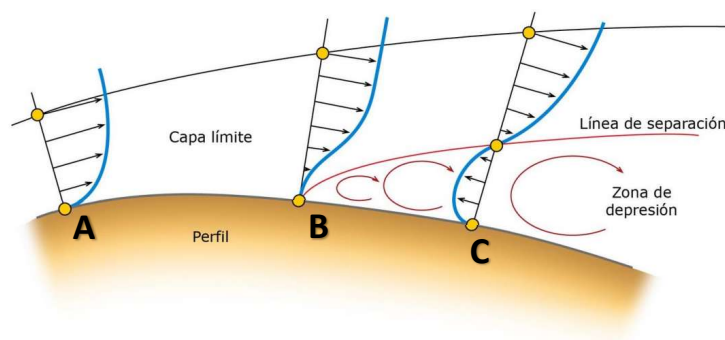


Imagen 4 - Capa Límite (David López Pérez, 2015)

3.2.2. Pérdidas de Carga en Tuberías (Pérdidas Distribuidas)

Las pérdidas de carga distribuidas tienen lugar en los tramos de conducción de diámetro o sección constante. Tienen su origen en el fenómeno de Resistencia de Superficie explicado anteriormente.

Las pérdidas de carga primarias las calcularemos con la ecuación experimental de Darcy-Weisbach:

$$H_{rp} = \lambda \frac{l \bar{c}^2}{D 2g} \quad (3)$$

Esta ecuación plantea, que las pérdidas de carga primarias son proporcionales al cuadrado de la velocidad media del fluido en la tubería y a la longitud de esta e inversamente proporcional a su diámetro.

Dónde:

H_{rp} : Pérdida de Carga Primaria [m];

λ : Coeficiente adimensional de pérdida de carga primaria la cual es función de la rugosidad de las paredes, la viscosidad del fluido y tipo de flujo;

l : Longitud de la tubería o conducto [m];

D : Diámetro de la tubería o conducto [m];

\bar{c} : Velocidad Media del fluido [m/s];

3.2.3. Pérdidas de Carga en Accesorios (Pérdidas Localizadas)

Las pérdidas de carga secundarias tienen lugar en los cambios de sección, codos, válvulas, etc. Se explican por Resistencia de Forma (desprendimiento de la capa límite). Se determinan mediante una ecuación de la siguiente forma:

$$H_{rs} = \zeta \frac{\bar{c}^2}{2g} \quad (4)$$

Dónde:

H_{rs} : Pérdida de Carga Secundaria [m];

ζ : Coeficiente adimensional de pérdida de carga secundaria;

\bar{c} : Velocidad Media del fluido [m/s];

El “ ζ ” depende del tipo de accesorio, del Número de Reynolds, de la rugosidad y hasta de la configuración de la corriente antes del accesorio. Los valores de ζ para cada accesorio los podemos encontrar en Anexo *A.2. Gráficos y Tablas para calcular Pérdidas en Tuberías*.

3.3. Curva del Sistema

A menudo, resulta necesario evaluar la evolución de un sistema de bombeo cuando este opera con distintos caudales. Para ello es útil utilizar el concepto de **Curva del Sistema**. La misma es independiente del tipo o cantidad de bombas que se utilice y solo tiene en cuenta la energía necesaria para proveer un determinado caudal entre dos puntos, que pueden o no estar a la misma altura y presión, a través de tuberías y accesorios, venciendo las resistencias que estos oponen.

Para hallar la ecuación que describa esta curva debemos partir de la siguiente ecuación:

$$H_N = \sum H = \left(\frac{p_2}{g\rho} - \frac{p_1}{g\rho} \right) + \left(\frac{\bar{c}_2^2}{2g} - \frac{\bar{c}_1^2}{2g} \right) + (z_2 - z_1) + \sum H_{rs}^i + \sum H_{rp}^i$$

La Altura Bruta es la diferencia entre ambos puntos $H_B = z_2 - z_1$, entonces:

$$H_N = \sum H = \left(\frac{p_2}{g\rho} - \frac{p_1}{g\rho} \right) + \left(\frac{\bar{c}_2^2}{2g} - \frac{\bar{c}_1^2}{2g} \right) + H_B + \sum H_{rs}^i + \sum H_{rp}^i \quad (5)$$

Dónde:

H_N : Es la energía que debe suministrar el equipo para cumplir los requerimientos [m];

3.4. Bomba Centrífuga (Rotodinámica)

3.4.1. Clasificación de las Bombas Hidráulicas

Una bomba es una máquina que absorbe energía mecánica y restituye al líquido que lo atraviesa energía hidráulica.

Las bombas se emplean para impulsar toda clase de líquidos (agua, aceite, combustibles, ácidos, etc.). También se emplean bombas para la impulsión de líquidos espesos con sólidos en suspensión, como pastas de papel, fangos, líquidos cloacales, petróleo y arena.

Las bombas empleadas en el sistema son las Bombas Rotodinámicas (Centrífugas). Su funcionamiento se basa en la ecuación de Eüler; y su órgano transmisor de energía se define como rodete o rotor. Se denominan rotodinámicas, porque su movimiento es rotativo, y la dinámica de la corriente juega un papel esencial en la transmisión de la energía. Pueden clasificarse según:

1. La dirección del flujo: bombas de flujo radial, flujo axial y de flujo mixto.
2. La posición del eje: bombas de eje horizontal, de eje vertical y de eje inclinado.
3. La presión que engendra: bombas de baja presión, de media presión y de alta presión.
4. El número de flujos en la bomba: de simple aspiración o de un flujo y de doble aspiración, o de dos flujos.
5. El número de rodetes: de una etapa o multietapa.

3.4.2. Elementos Constitutivos de las Bombas Rotodinámicas

En la *Imagen 5 – Despiece Bomba Centrífuga* se representa el corte de una bomba rotodinámica horizontal de carcasa partida y doble entrada, como las que se utilizan en el sistema de bombeo en consideración:

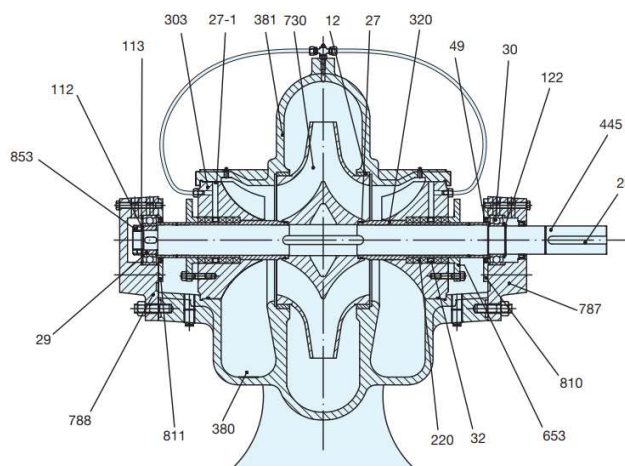


Imagen 5 - Despiece Bomba Centrífuga [16]

12	Aro de Cierre	303	Caja Prensa Posterior
22	Chaveta del Rodete	320	Casquillo Prensa
23	Chaveta del Acoplamiento	380	Cuerpo Inferior
27	Juego de Juntas	381	Cuerpo Superior
27-1	Juego de Juntas	445	Eje de la Bomba
29	Rodamiento Posterior	653	Prensa Estopas
30	Rodamiento Anterior	730	Rodete Doble Aspiración
32	Empaquetadura	787	Soporte Rodamiento Anterior (Grasa)
49	Retén de Aceite	788	Soporte Rodamiento Posterior (Grasa)
112	Arandela	810	Tapa Rodamiento Anterior (Grasa)
113	Arandela	811	Tapa Rodamiento Posterior (Grasa)
122	Anillo Elástico	853	Tuerca Izquierda
220	Aro de Refrigeración		

Tabla 1 – Detalle de Partes de Bomba Centrífuga Carcaza Partida

Se considera que los componentes más importantes de una bomba centrífuga son:

- **Rodete**, órgano encargado de transferir energía al fluido.
- **Carcasa**, órgano encargado de guiar adecuadamente el líquido hasta el rodete y de recolectar el mismo, guiándolo hasta la salida. El rendimiento de la bomba depende en gran medida de un buen diseño de carcasa. El difusor en las bombas rotodinámicas, transforma de manera eficiente la energía cinética del fluido en energía de presión. En la Imagen 5 este órgano está compuesto por los ítems 380 y 381;
- **Eje**, elemento encargado de transferir energía mecánica desde el acoplamiento al rodete. El mismo suele vincularse al rodete mediante una chaveta;
- **Sellos**, estos elementos se encargan de que no exista pérdidas de fluidos al exterior ni recirculación dentro de la carcasa;

3.4.3. Principio de Funcionamiento de una Bomba Centrífuga (Rotodinámica)

Es importante analizar el rodete ya que, como dijimos anteriormente, el intercambio de energía mecánica y del fluido en una bomba se verifica únicamente en él. Los restantes órganos de la máquina por dónde circula el fluido son o meramente conductos, transformadores de una forma de energía que ya posee el fluido en otra.

La ecuación de Eüler expresa la energía por unidad de masa intercambiada en el rodete es la ecuación de Eüler. La ecuación de Eüler se basa en cuatro hipótesis que limitan su validez:

- I. Régimen Permanente;
- II. Fluido Ideal;
- III. Flujo Irrotacional;
- IV. Método Unidimensional;

Para realizar el análisis planteado en el rodete, se plantean dos aspectos. El primero, es que la partícula de fluido que atraviesa el mismo, posee una trayectoria relativa y otra trayectoria absoluta. Lo indicado se puede observar en la *Imagen 6 – Trayectorias absoluta y relativa de una partícula de fluido q atraviesa el rodete de una bomba.*

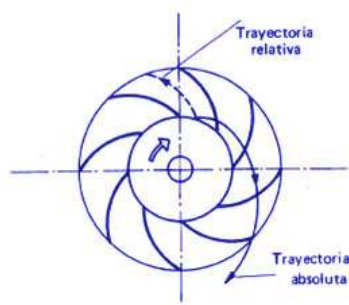


Imagen 6 - Trayectorias absoluta y relativa de una partícula de fluido que atraviesa el rodete de una bomba [15]

El segundo es que para poder realizar un análisis dentro del rodete es útil, o mejor dicho necesario, emplear una herramienta conocida como Triángulos de Velocidades.

Según la mecánica del movimiento se tendrá que en cada punto: *la velocidad relativa del fluido con respecto al rodete es igual a la velocidad absoluta del fluido menos la velocidad absoluta del rodete*. Usando notación vectorial tendremos:

$$\vec{w} = \vec{c} - \vec{u} \quad (6)$$

Dónde:

\vec{w} : Velocidad del fluido con relación al rodete;

\vec{c} : Velocidad absoluta del fluido;

\vec{u} : Velocidad absoluta del rodete;

Se observa este concepto aplicado a una bomba centrífuga en la *Imagen 7 – Triángulos de Velocidades en una Bomba Centrífuga*.

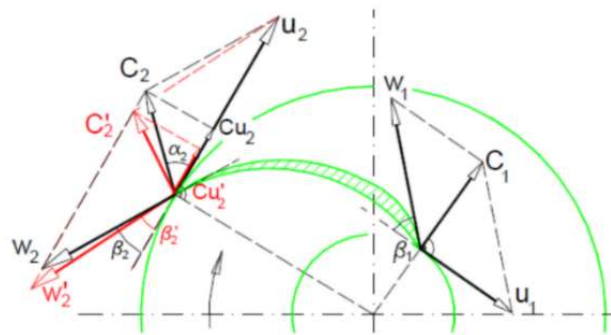


Imagen 7- Triángulos de Velocidades en una Bomba Centrífuga [15]

De esta manera se puede plantear tenemos la primera forma de la ecuación de Eüler, que relaciona el estado de la partícula en 1 y en 2:

$$Y_u = (u_2 * c_{2u} - u_1 * c_{1u}) \quad (7)$$

Y_u : Salto Energético. Representa la energía absorbida por el fluido;

u_i : Velocidad Absoluta del Rodete en ese punto;

c_{i_u} : Componente de la Velocidad Absoluta del Fluido en la dirección a u_i . Se denomina componente periférica de la velocidad absoluta, su módulo se utiliza para evaluar la energía específica intercambiada por la bomba;

c_{i_m} : Componente Meridional de la Velocidad Absoluta. Es utilizada para calcular el caudal;

En términos de altura:

$$H_u = \frac{Y_u}{g} = \frac{1}{g} * (u_2 * c_{2u} - u_1 * c_{1u}) \quad (8)$$

H_u : Altura del Rodete, Altura Útil;

Esta energía transmitida por el rodete se debe a la interacción pura entre el rodete y el mismo. Luego éste experimenta pérdidas, cuando atraviesa la envolvente, debido a caudales recirculantes, la disipación de calor por fricción entre la superficie de los alabes y el fluido, entre otras. Es por esto que la energía entregada por la bomba es:

$$H_N = H_u - H_{r-int} \quad (9)$$

H_N : Altura de Carga Dinámica, Altura Neta o Altura Manométrica;

Si analizamos la energía entre las bridas de entrada (E) y de salida (S) de la bomba mediante la ecuación de Bernoulli se tendrá:

$$\frac{p_E}{\rho} + z_E * g + \frac{c_E^2}{2} + g * H_N = \frac{p_S}{\rho} + z_S * g + \frac{c_S^2}{2}$$

$$H_N = \frac{(p_S - p_E)}{g * \rho} + (z_S - z_E) + \frac{(c_S^2 - c_E^2)}{2g}$$

Donde H_N es la Altura de Carga Dinámica de la bomba. Es la energía que la bomba transmite efectivamente al fluido entre las bridas de Entrada y Salida.

Por último, es conveniente definir la diferencia altura entre los dos espejos de agua:

$$H_B = z_S - z_E \quad (10)$$

H_B : Altura Bruta o Altura Geodésica;

3.4.4. Curvas Características de las Bombas

La representación gráfica de la curva de funcionamiento, se denomina curva característica de una Bomba. Este diagrama se obtiene mediante un ensayo completo en un banco.

La misma representa la evolución $H = f(Q)$, dónde se mantienen constantes la velocidad de giro n y el diámetro d del rodete.

En la intersección entre la curva de funcionamiento de la bomba y la curva del sistema se halla el punto de funcionamiento del Sistema de Bombeo, del cual se desprenden caudal suministrado y rendimiento de operación.

La imagen representa un sistema de bombeo con una bomba en funcionamiento y una en reserva. La curva azul representa la de funcionamiento de la bomba, la roja representa la del sistema y el punto A representa el punto de funcionamiento.

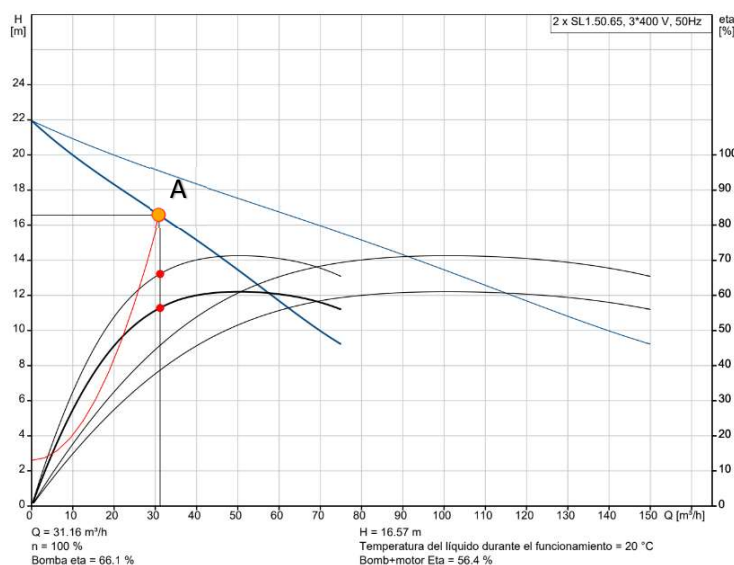


Imagen 8 - Punto de Funcionamiento, [13]

3.5. Velocidad Específica

Definición: El número específico de revoluciones, o velocidad específica, es el número de revoluciones a las que debería girar una Turbomáquina Hidráulica, en este caso una bomba, para elevar un caudal de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua a 1 m de altura, con un rendimiento óptimo.

Todas las bombas, geoméricamente semejantes, tienen la misma velocidad específica, siempre que se considere el mismo fluido entre ellas y se suponga idéntico rendimiento.

En función del Caudal:

$$n_s = n * Q^{1/2} * H^{-3/4} \quad (11)$$

Dado que una bomba no tiene solo un punto de funcionamiento sino un campo, siempre que no se especifique el n_s estará referido al punto de óptimo rendimiento.

3.6. Funcionamiento de Bombas en Paralelo

En principio se entiende como conexión en paralelo cuando dos o más bombas descargan en la misma tubería presurizada o colector.

Es conveniente utilizar un sistema en paralelo, con dos o más bombas, cuando se dispone de una instalación dada y el tamaño de una sola bomba sería excesivo o bien cuando hay una variabilidad en el consumo que justifique tener encendida una, dos o todas las bombas. De esta manera, el análisis para la confección de un sistema de bombeo en paralelo requiere un análisis de esta variabilidad del consumo.

La *Imagen 9 – Curvas de Sistema de Bombeo con dos Bombas en Paralelo*, en cuya ordenada está la carga y en su abscisa el caudal suministrado, muestra la evolución de un sistema con dos bombas en paralelo. Como se expresa anteriormente los puntos de funcionamiento de la bomba están dados por la intersección de la curva del sistema con la curva de funcionamiento de la bomba.

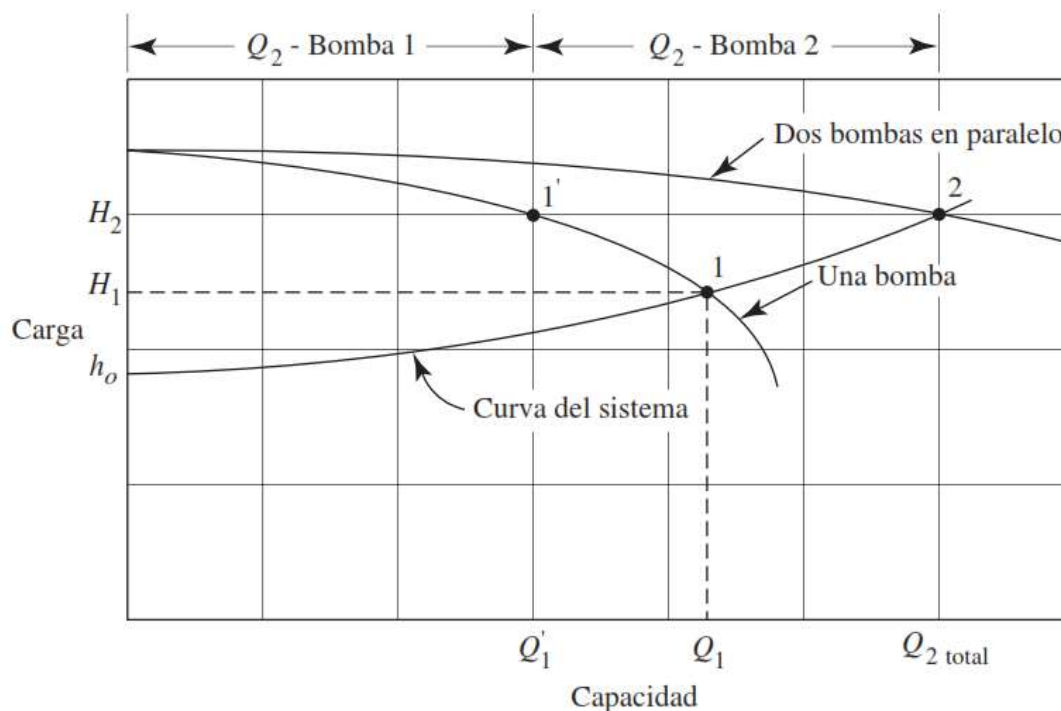


Imagen 9 - Curvas de Sistema de Bombeo con dos Bombas en Paralelo [2]

Si en el sistema opera una sola bomba, esta entrega un caudal volumétrico Q_1 a una carga H_1 .

Si se necesita más caudal se enciende la segunda bomba, en este caso de iguales características a la primera. Se observa que el flujo aumentará, pero también lo hacen las pérdidas distribuidas y localizadas, ya que éstas son función de la velocidad a la que el fluido se mueve por la cañería y sus accesorios (válvulas, codos, etc.). Entonces el nuevo punto es 2, el cual eroga un caudal Q_2 a una carga H_2 . Se observa que la bomba experimenta un alza en su carga y su nuevo punto de funcionamiento es 1', donde entrega un caudal volumétrico Q_1' . Una vez que se alcanza el equilibrio, las dos bombas distribuyen caudales iguales, cada uno igual a la mitad del caudal total Q_2 .

Debe seleccionarse bombas que tengan rendimientos aceptables en ambos puntos, 1 y 1'. Por lo que es necesario analizar de manera profunda, todas las combinaciones de operación a las cuales se verán sometidas las mismas.

3.7. Cavitación

3.7.1. Descripción del Fenómeno

En hidrodinámica, el término CAVITACIÓN refiere a condiciones donde una evaporación parcial del fluido ocurre en un sistema hidráulico. Cuando la presión baja a la presión de vapor, una burbuja llena de vapor es formada. Parte del fluido se evapora, y en un área dada toma lugar un FLUJO BIFÁSICO. Como la burbuja se mueve hacia una región donde la presión es mayor a la presión de vapor, la burbuja de vapor colapsa inmediatamente.

La cavitación se ve favorecida cuando hay núcleos presentes en el fluido. Núcleos son grupos de gases o vapor de agua los cuales están presentes en forma de burbujas microscópicas, de diámetro aproximado de $10^{-3} - 10^{-1} \text{ mm}$. En prácticamente todo tipo de procesos técnicos con diferentes tipos de fluidos, se tiene la presencia de una cantidad suficiente de núcleos para que la cavitación ocurra.

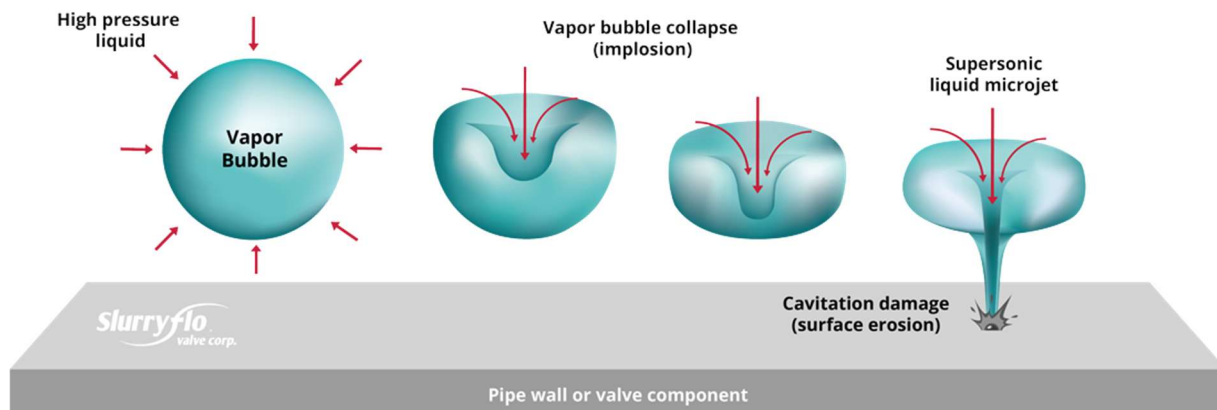


Imagen 10 - Esquema de Implosión de Burbujas (<https://www.slurryflo.com/cavitation>)

En la práctica las burbujas colapsan de manera asimétrica, y al final del proceso un micro jet, y una onda de choque es producida; siempre están dirigidos hacia la zona de menor presión. Cuando colapsan en el seno del fluido no hay consecuencias directas sobre los equipos; pero cuando lo hacen cerca de las paredes, el micro jet produce gran daño sobre el material.

3.7.2. Parámetros de Cavitación

El potencial de producirse la cavitación, se evalúa mediante distintos parámetros. En nuestro caso, con la intención de medir y predecir el fenómeno, definiremos y utilizaremos el NPSH (Net Pressure Suction Head por sus siglas en inglés).

$NPSH_d$ o $NPSH_{available}$ (por sus siglas en inglés): es la energía neta con la que el líquido, sobre la presión de vapor, llega a la brida de entrada (definición según ANSI/HI 9.6.1. - 2012 [11]).

Para entender el concepto de energía a la entrada sobre la presión de vapor, analizaremos el concepto por partes. Primero definimos cual es la energía en la brida de entrada H_E ; para ello identificamos el plano a la entrada con el subíndice E. El plano de referencia es el horizontal que contiene al eje de la bomba y es perpendicular a la brida de entrada, entonces:

$$H_E = \frac{p_E}{\rho * g} + \frac{c_E^2}{2 * g}$$

Sabemos que el valor mínimo de la presión a la entrada no es cero, sino que es el valor de la presión de vapor p_v , a la temperatura de trabajo. Entonces:

$$H_{Ed} = \frac{p_E}{\rho * g} + \frac{c_E^2}{2 * g} - \frac{p_v}{\rho * g} \quad (12)$$

Por otra parte, si aplicamos Bernoulli entre los puntos 1 y E (ubicado en la brida de entrada):

$$\frac{p_E}{\rho * g} + \frac{c_E^2}{2 * g} = \frac{p_1}{\rho * g} + \frac{c_1^2}{2 * g} + z_1 - \sum H_{rs}^i - \sum H_{rp}^i \quad (13)$$

Si combinamos las ecuaciones anteriores:

$$H_{Ed} + \frac{p_v}{\rho * g} = \frac{p_E}{\rho * g} + \frac{c_E^2}{2 * g} = \frac{p_1}{\rho * g} + \frac{c_1^2}{2 * g} + z_1 - \sum H_{rs}^i - \sum H_{rp}^i$$

$$NPSH_d = H_{Ed} = h + \frac{(p_1 - p_v)}{\rho * g} - \sum H_{rs}^i - \sum H_{rp}^i \quad (14)$$

Dónde:

p_1 : Presión atmosférica [Pa];

p_v : Presión de Vapor a la temperatura de trabajo [Pa];

H_1 : Altura total en la brida de entrada [m];

$\sum H_{rs}^i$: Sumatoria de pérdidas localizadas [m];

$\sum H_{rp}^i$: Sumatoria de pérdidas distribuidas [m];

$NPSH_r$: conceptualmente, el mínimo $NPSH$ brindado por el fabricante, bajo el cual la bomba desarrolla la performance especificada a un flujo, velocidad y líquido específicos (definición según ANSI/HI 9.6.1. - 2012 [11]).

Uno de los efectos más notables de la cavitación, es la degradación de la performance de una bomba debido a la presencia de una fase de vapor inducida por cavitación. La migración y el colapso de las burbujas afectan el flujo dentro del impulsor y hace que disminuya la performance de la bomba.

El *Hydraulic Institute* define al $NPSH_r$ requerido para una bomba, como el $NPSH_a$ que causa una pérdida o caída del 3% altura total, esto debido al bloqueo del flujo del vapor de cavitación entre los alabes del impulsor. El $NPSH$ requerido calificado por este criterio, se denomina $NPSH_{3\%}$. El valor de caída de altura del 3%, es basado sobre prácticas aceptadas por la industria para definir una condición de descomposición de la cabeza debido a la cavitación.

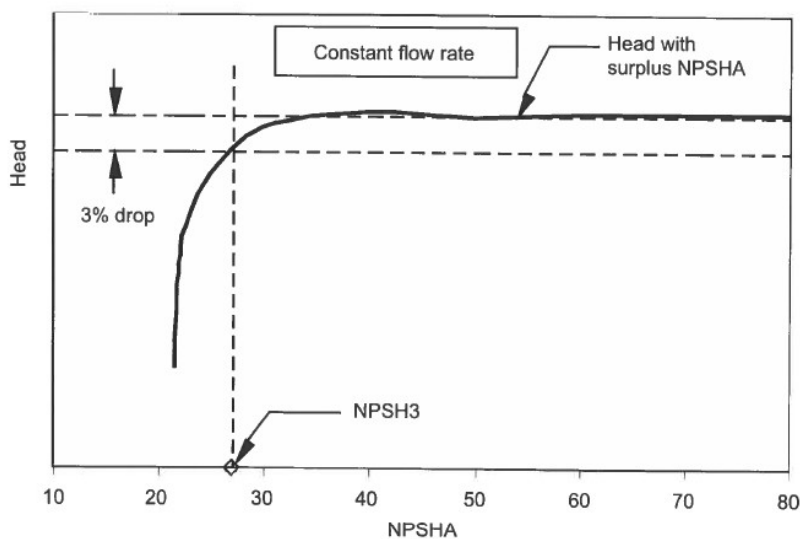


Figure 9.6.1.1c — $NPSH_3$ determination for constant flow rate

Imagen 11 - Altura Neta vs $NPSH_a$. Criterio $NPSH_{3\%}$. [11]

3.7.3. Como Determinar la presencia de Cavitación

El fenómeno de cavitación comienza mucho antes de que se manifiesten claramente sus efectos.

En su forma primitiva la cavitación posee un punto incipiente donde comienza ($NPSH_i$), denominado punto de inepción. En el mismo generalmente no hay evidencias que lo delaten.

Luego, si sigue decreciendo la presión en la succión, empezará a aparecer ruido. En este estado no hay una clara disminución de altura en la impulsión, pero el daño en los componentes mecánicos comenzará a ser relevante.

Si seguimos disminuyendo la presión en la succión se observará una caída en la altura en la impulsión. Pero como ya dijimos anteriormente, el daño comenzó mucho antes.

Cerca del punto donde la pérdida de altura es evidente, el daño disminuye; esto se debe a un efecto amortiguador de las burbujas. Entonces, existe un punto de máximo daño por cavitación entre el comienzo y el punto donde la pérdida de altura es evidente.

En la siguiente figura se puede observar una gráfica Altura Neta vs NPSH para un caudal Q constante a una velocidad N constantes, y como es la presencia de cavitación en diferentes puntos.

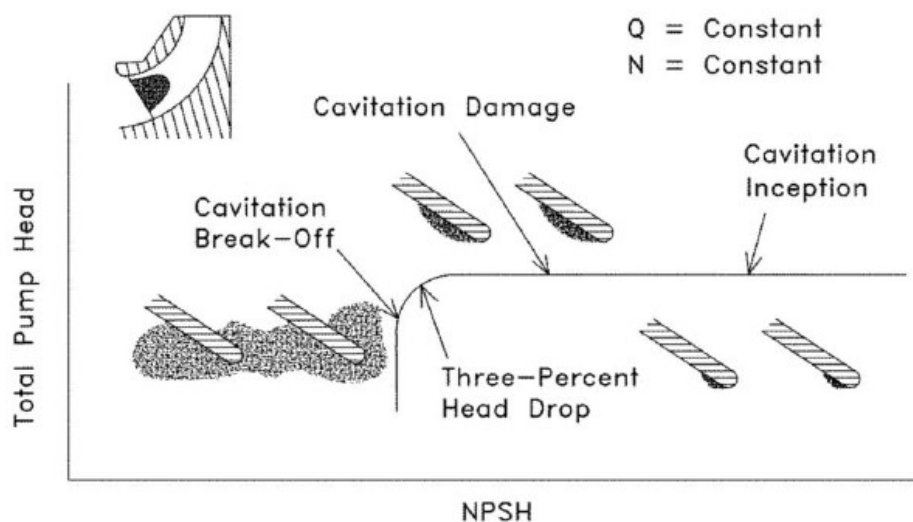


Imagen 12 - Presencia de Cavitación en función del $NPSH_d$ [11]

El punto de 3% de pérdida de altura es función de Q y N , entonces para cada par de estos valores habrá un $NPSH_{3\%}$.

4. RELEVAMIENTO DE LA ESTACIÓN DE BOMBEO

4.1. Descripción General del Sistema

La central de bombeo cuenta con tres (3) bombas centrífugas en paralelo, según los datos disponibles en el pliego a licitación, dos (2) en servicio permanente y una (1) de reserva. La misma cuenta con una obra de toma desde el canal principal. Cada bomba cuenta con una succión individual, una válvula mariposa en la succión, una válvula de retención y una válvula mariposa en la impulsión. El sistema de impulsión consta de un tramo de tubería desde cada bomba hasta un manifold o “pantalón”, desde el cual el agua se conduce por una tubería de mayor tamaño hasta la cámara de descarga.

4.2. Relevamiento de las Instalaciones

Como se explicó con antelación, sobre el canal principal de “La Picacita” se encuentra la obra de toma de la central de bombeo, la misma cuenta con una compuerta sobre el canal para elevar el nivel de agua y garantizar la sumergencia de la cañería de succión. También cuenta con una reja para evitar que ingresen residuos sólidos de gran tamaño, ver *Imagen 13 – Obra de Toma Central de Bombeo “La Picacita” Junio 2019*. En esta parte el canal principal presenta una ampliación en su sección. Debido a esto, y como se explicará más adelante, la velocidad del flujo de agua disminuye prevaleciendo la precipitación de sólidos en el lecho del canal.



Imagen 13 - Obra de Toma Central de Bombeo “La Picacita” Junio 2019

Luego de la reja se encuentra la cámara de carga, desde la cual cada bomba cuenta con una tubería propia, como se ve en la *Imagen 14 – Cámara de Carga de Bombas*; para poder realizar un análisis a posteriori fue necesario relevar tanto los componentes de la obra civil de toma como así también los niveles del canal principal para establecer datos importantes como sumergencia e interferencias entre otras. Como resultado de este relevamiento se confeccionó un CAD, ver *Imagen 15 – Plano Succión de Bombas* Dicho relevamiento dimensional se realizó en dos etapas, en correspondencia con la parada de mantenimiento y en operación.



Imagen 14 - Cámara de Carga de Bombas

Se puede observar también que hay un diente antes de ingresar a las rejillas. Este se colocó, según los operarios, para intentar impedir el ingreso de arena a la cámara.

Aquí aparece el primer dato importante; la distancia desde el piso de la cámara de carga hasta donde comienza la pollera es de 0.19 mts, siendo la cañería de succión de DN500.

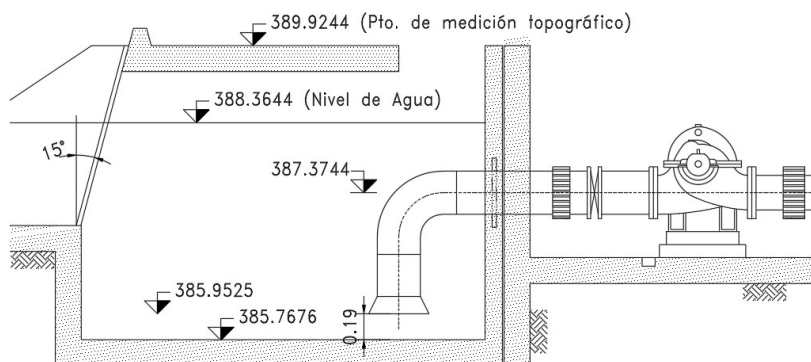


Imagen 15 - Plano Succión de Bombas

El agua ingresa por el cono de succión, y pasa por la tubería hasta un codo de 90°, las bombas 1 y 3 poseen un codo extra de 90°. Como se puede ver en la *Imagen 16 – Vista en Planta Central de Bombeo*.

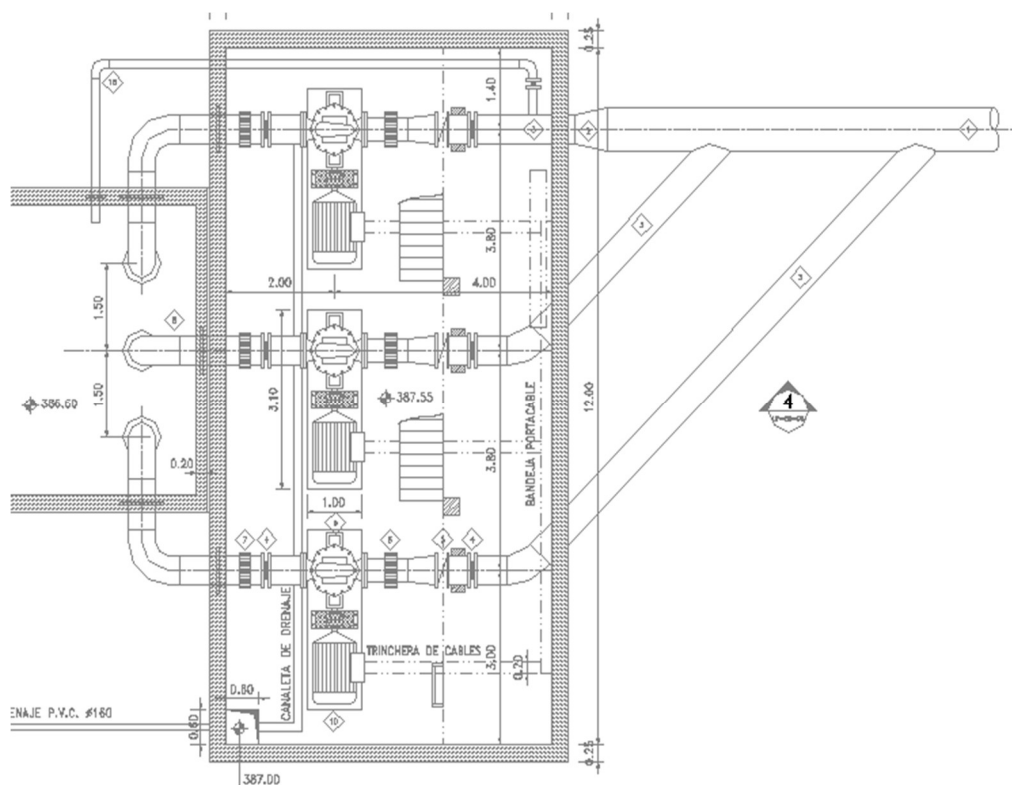


Imagen 16 - Vista en Planta Central de Bombeo

Luego de ingresar por la succión (tubería DN500), el agua pasa por una válvula mariposa tipo WAFER DN500, ingresa en la bomba y sale con DN400 por lo que para empalmarse con la tubería de impulsión es necesaria una transición 400-500, atraviesa una válvula antirretorno DN500 (las Bombas 1 y 2 poseen de disco oscilante y la Bomba 3 de disco partido), luego por otra válvula mariposa tipo WAFER DN500 y finalmente continúa por una tubería de DN 500 hasta unirse en un manifold que posee diámetro de salida 700.

La distancia desde el manifold hasta la descarga es de 152 mts.

La cámara de descarga cuenta con una reja como se ve en la siguiente *Imagen 17 – Vista Cámara de Descarga*. Siguiendo el mismo análisis que con la cámara de carga, se realizó un relevamiento dimensional de la cámara de descarga (*Imagen 18 – Vista en Corte Cámara de Descarga*), para dos momentos diferentes, con y sin caudal de agua.



Imagen 17 - Vista Cámara de Descarga

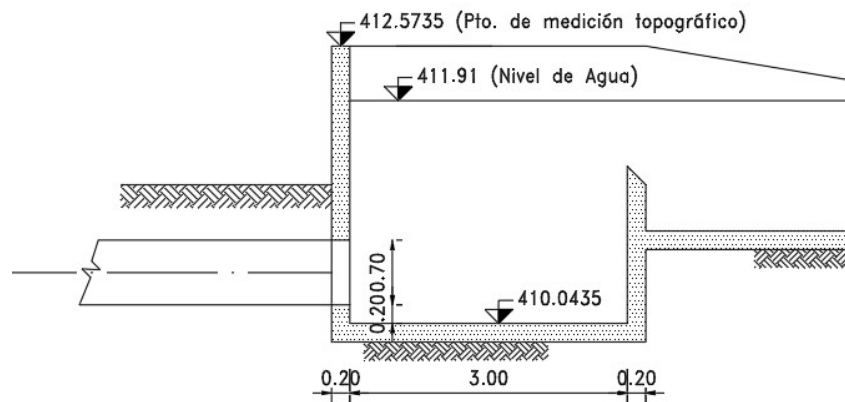


Imagen 18 - Vista en Corte Cámara de Descarga

En la cámara de descarga, también se puede observar la gran cantidad de arena que se deposita durante la temporada de riego.

Con la estación total topográfica, propiedad de la Subsecretaría de Recursos Hídricos, se tomó la altura desde el pelo de agua en el canal principal (cota 388.364 m.s.n.m), hasta el nivel de agua en la cámara de descarga (cota 411.91 m.s.n.m). Con estas dos cotas, o niveles, estableció la altura bruta del sistema (H_B) según la ecuación (10).

$$H_B = C_{superior} - C_{inferior} = 411.91 \text{ m} - 388.364 \text{ m}$$

$$H_B = 23.5456 \text{ m}$$

Finalmente, la estación de bombeo es alimentada por una Sub Estación Transformadora (SET). La energía que se compra es en Media Tensión (MT). Desde la SET un cable subterráneo

conecta la casa de máquinas donde se encuentra un tablero general, tres tableros individuales (uno para cada bomba), y un banco de capacitores.



Imagen 19 - Tablero de Medidores

4.3. Relevamiento de los Equipos

La estación de bombeo, como ya se detalló anteriormente, cuenta con tres (3) bombas centrífugas de carcasa partida marca IDEAL accionadas por motores eléctricos. Conforme en lo indicado en las chapas identificatorias de las bombas (ver *Imagen 20 – Chapa de Bomba Centrífuga*) de la bomba se obtienen los siguientes datos: de $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ a una altura manométrica de 25 m , diámetros de succión e impulsión DN400-DN400 y un consumo de 160 KW a una velocidad de $n = 990 \text{ rpm}$.



Imagen 20 - Chapa de Bomba Centrífuga

Al indagar en los catálogos online del fabricante, no se encontró información sobre el modelo CPN 400-400. Conforme a esta situación, no se dispone de la curva de

funcionamiento de la bomba, por lo que es difícil determinar el punto de operación real de la misma.

Conforme a información recibida por los operadores, es práctica habitual que se enciendan las tres (3) bombas en la temporada de riego, dejando el sistema sin bomba de reserva.

En lo referido a instrumentos de medición, se tienen manómetros, solamente en la impulsión (ver *Imagen 21 – Manómetros*), los se encuentran fuera de servicio y además no cuentan con un rango óptimo de medición.



Imagen 21 - Manómetros






Cada bomba es impulsada por un motor ABB, ver *Imagen 22 – Placa de Motor Bomba 3*, el que es alimentado desde el tablero de comando de cada equipo.

ABB Motors CE							
3~ Motor M2CA 355 S3 G 100							
IEC 355 S 100							
M 51001				No 3363550		IP	
V	Hz	kW	r/min	A	cosφ	I _A /I _N	t _E /s
690Y	50	160	992	165	0.85		
400D	50	160	992	200	0.85		
660Y	50	160	991	170	0.85		
380D	50	160	991	245	0.85		
415D	50	160	993	275	0.85		
740D	160	195	1190	310	0.85		
Prod. code: GCA353120-ADA							
6322/C3		319/C3				kg	
IEC 34 -1							

Imagen 22 - Placa de Motor Bomba

4.3.1. Relevamiento de Daño en Impulsores

A continuación, se detalla el estado de las bombas luego del período de riego indicado:

<i>Período</i>	<i>Equipo</i>	<i>Relevamiento Fotográfico</i>	<i>Daño</i>
2014-2015	B1		Pérdida de Material Base Oxidación
	B2		Pérdida de Material Base Oxidación
	B3		Pérdida de Material Base Oxidación
2015-2016	B1		Abrasión
	B2		Ninguno



	B3		Abrasión
2016-2017	B1	DE ESTE PERÍODO NO SE TIENEN REFISTROS FOTOGRAFICOS	Se informa
	B2		que solo hubo
	B3		abrasión de la pintura epoxi
2017-2018		DE ESTE PERÍODO NO SE TIENEN REGISTROS FOTOGRAFICOS	
2018-2019	B1		Pérdida de Material Base Oxidación
	B2		Pérdida de Material Base Oxidación
	B3		Pérdida de Material Base Oxidación

Tabla 2 – Relevamiento de Rodetes

4.3.2. Medición de Caudal

Este factor fue clave, ya que es necesario cuantificar de manera específica cual es el caudal que eroga cada bomba, así como también que caudal se eroga con dos bombas en funcionamiento.

4.3.2.1. Selección de Metodologías y Empresa

Como ya se dijo, la estación de bombeo no cuenta con caudalímetros, por lo que fue necesario contratar un servicio de medición. Para ello primero se analizaron las empresas de la zona que podrían, con la metodología y equipamientos, para garantizar una medición confiable.

Se tomó contacto con dos empresas para realizar la medición, teniendo en cuenta dos metodologías bien diferenciadas. La primera de la firma EVARSA que medía los caudales en los canales de riego aguas arriba y abajo, a partir de la sección del canal y con una sonda se obtenía la velocidad del agua en distintos puntos; la segunda propuesta provino de la firma LAZOS, la cual contemplaba la medición en el tramo de la tubería de impulsión de cada bomba con un caudalímetro por ultrasonido.

Ambas propuestas presentaban ventajas y desventajas. Para la evaluación se consideran tres categorías, a) Obtención de todos los datos, datos necesarios; b) Exactitud de los datos; c) Costo del servicio.

Desde la Subsecretaría de Recursos Hídricos se estableció que, dado que se contrataría un servicio de medición de caudales, el mismo debería ser utilizado también para medir, además de los caudales erogados por las bombas, el caudal del canal principal desde donde se abastece la estación de bombeo, y el de dos canales aguas debajo de la estación de bombeo denominados Margen Izquierda y Margen Derecha. Dado que la firma EVARSA era la única que proveía el servicio de medición en canales a cielo abierto, esta opción fue la seleccionada finalmente.

Respecto al costo, EVARSA también ofreció una mejor propuesta. Pero con respecto a la exactitud de los datos se debe realizar una aclaración importante. Como la medición del caudal por la firma EVARSA se realiza de manera indirecta, se determina la velocidad y el área, por más precisos que sean instrumentos y metodologías, dependen fuertemente de que estos dos parámetros no varíen en el tiempo, por lo que cuando una bomba se enciende o se apague debe esperarse el tiempo suficiente para que el nivel del canal y la velocidad del agua se mantengan constante.

4.3.2.2. Descripción de la Metodología y Puntos de Interés

Se contempla la medición de caudal en siete secciones dentro del Sistema de Canales de Riego de La Picacita, cuya ubicación se determinará en forma conjunta con la Inspección y bajo caudales enviados por el manejo de bombas que serán determinados por la Inspección.

Las mediciones de caudal se realizarán a partir de la obtención de datos de velocidad y profundidad con un Perfilador Acústico de Corriente por Efecto Doppler (ADCP), obteniendo el posicionamiento mediante un GPS de cada uno de los puntos extremos de los perfiles relevados.

El ADCP será llevado por un técnico que se introducirá en los canales. En la pantalla de una PC portátil ubicada en la orilla, además de los datos adquiridos se pueden visualizar las trayectorias prefijadas de los perfiles de medición y el posicionamiento a tiempo real del instrumento.

La frecuencia es de una medición cada 2 segundos, lo que combinado a la velocidad de traslación del catamarán que lo porta, del orden de 1.5 m/s, permite relevar un punto del lecho cada 3 metros aproximadamente.

Una vez procesados, se entregará la información en soporte digital, en un plazo de 5 días hábiles, posteriores a la realización de las mediciones.

La información a entregar consiste en los datos de velocidad (componentes y resultante), distribuidas en profundidad para cada punto de medición de cada perfil, en una planilla tipo Excel y un plano de cada perfil batimétrico en AutoCad.

El ADCP en cada vertical de medición divide la columna de agua, en segmentos uniformes apilados llamados "celdas de profundidad" (ver **Imagen 23 – Esquema de Celdas para la adquisición de Datos de Caudal, A.4.**). En cada celda se obtiene el valor de la velocidad del agua y el caudal que atraviesa la celda.

En las mediciones se adoptará una altura de celda de entre 0.25 – 1.00 m, a requerimiento del Cliente. El ancho de la celda depende de la distancia que recorre la embarcación en el tiempo transcurrido entre la medición de dos verticales de medición consecutivas.

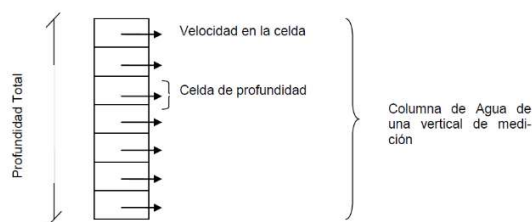


Imagen 23 - Esquema de Celdas para la adquisición de Datos de Caudal, A.4.

Las componentes de la velocidad son con dirección Este-Oeste y signo positivo hacia el Este, llamada Velocidad Este y con dirección Norte-Sur, con signo positivo hacia el Norte, denominada Velocidad Norte. De la composición de estas dos se obtiene el módulo y dirección de la velocidad.

El caudal total de cada vertical, es la sumatoria de los caudales que atraviesan cada celda de toda la columna de agua.

Se entregará un archivo Excel conteniendo la información de cada perfil de medición.

Esa información estará ordenada en 9 columnas, como se puede apreciar en la **Tabla 3 – Datos de Caudales obtenidos en el Aforo de EVARSA (ver ANEXO A.4.)**.

4.3.2.3. Obtención de Datos

Para realizar las mediciones de caudal, la noche previa se encendieron las dos bombas (Bomba I y Bomba III). El orden de las mediciones se puede ver en la columna indicada como hora de la medición. Se pueden observar todos los datos en el **A.4. Informe de Aforo de EVARSA**. A continuación, se presenta la **Tabla 3**, con el fin de sintetizar los valores brindados por la empresa:

ITEM	BOMBA	CAUDAL (m^3/s)
1	BOMBA I	-
2	BOMBA II	-
3	BOMBA III	0.432
4	BOMBA I + BOMBA II	0.858
5	BOMBA I + BOMBA III	0.861
6	BOMBA II + BOMBA III	0.836
7	BOMBA I + BOMBA II + BOMBA III	1.128

Tabla 3 – Datos de Caudales obtenidos en el Aforo de EVARSA (ver ANEXO A.4.)

Si bien no se tienen datos de caudal de las BOMBAS I y II, podemos analizar determinados aspectos de las mismas. Como se observa en la *Imagen 16 – Vista en Planta Central de Bombeo*, la BOMBA II tiene un tramo más angosto y un codo extra que no tiene la BOMBA I, por lo tanto, tiene sentido que las pérdidas que experimenta la BOMBA II sean ligeramente mayores. Además, la BOMBA III, posee un tramo angosto mayor al de la BOMBA II, por lo que tiene sentido que los caudales erogados con los sistemas BI+BII y BI+BIII sean mayores, y bastantes similares, a los erogados por el sistema BII+BIII.

Como declaración final, si bien lo hemos aclarado antes, fijaremos el Caudal Nominal (Q_n), de cada bomba al suministrado por la placa de la misma:

$$Q_n = 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$$

4.4. Curva Característica de la Bomba

Al no contar con la información del fabricante, se procederá con la información disponible a desarrollar una curva que represente, al menos, los datos con que se cuenta.

Primero se analizarán bombas similares de la marca IDEAL, luego se desarrollarán las curvas del sistema para una bomba, dos bombas y tres bombas en funcionamiento. Para finalmente generar una curva que represente los datos.

4.4.1. Análisis de Bombas de la firma Ideal

Como ya se ha aclarado desde un principio, no se cuenta con información de la bomba en cuestión, por esta razón se recurre a la página web de la firma Ideal para encontrar referencias, en este caso del modelo **CPN 400-400**. Luego de analizar los catálogos disponibles, se puede observar que la fábrica solo cuenta con las series o modelos CP, CPI, CPH y CPR.

Se procede a seleccionar un modelo de bomba, que actualmente se encuentre en producción, y que posea la capacidad de erogar el caudal de $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ a 25m girando a una velocidad cercana a 990 rpm . Para ello utilizaremos la carta de performance que se presenta en la *Imagen 24 – Carta de Performance Bombas CPH Ideal (<https://www.bombasideal.com/>)*

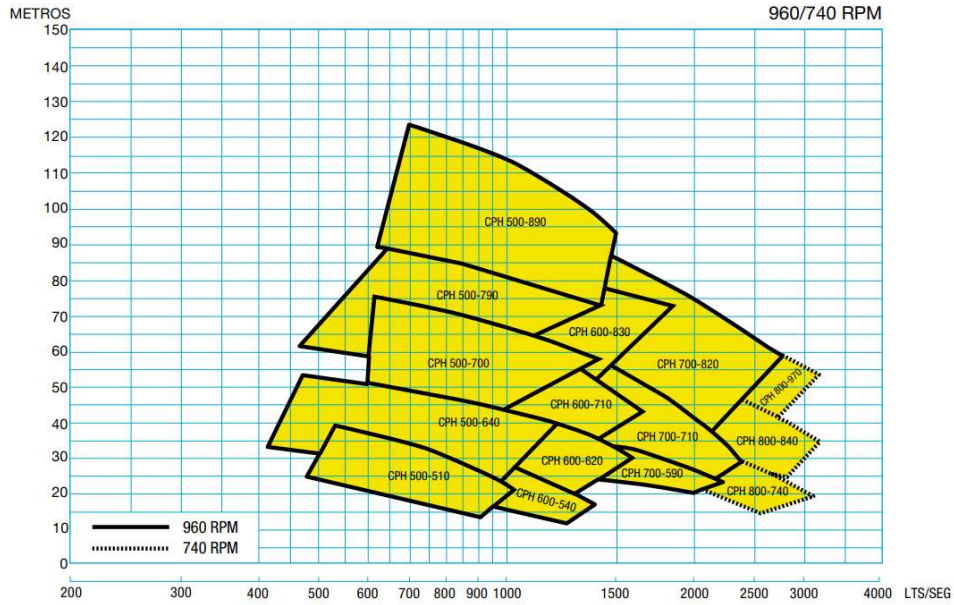


Imagen 24 - Carta de Performance Bombas CPH Ideal (<https://www.bombasideal.com/>)

Se puede ver que para cumplir estos requerimientos, el equipo que la empresa puede ofrecer es el **CPH 500-510**; además, y dado que se encuentra casi fuera del rango, compararemos con el modelo **CPH 500-640**. Estas dos bombas poseen diámetro de succión 600mm y de impulsión 500mm (ver **Imagen 25 – Curvas de Bombas Analizadas**(<https://www.bombasideal.com/>)).

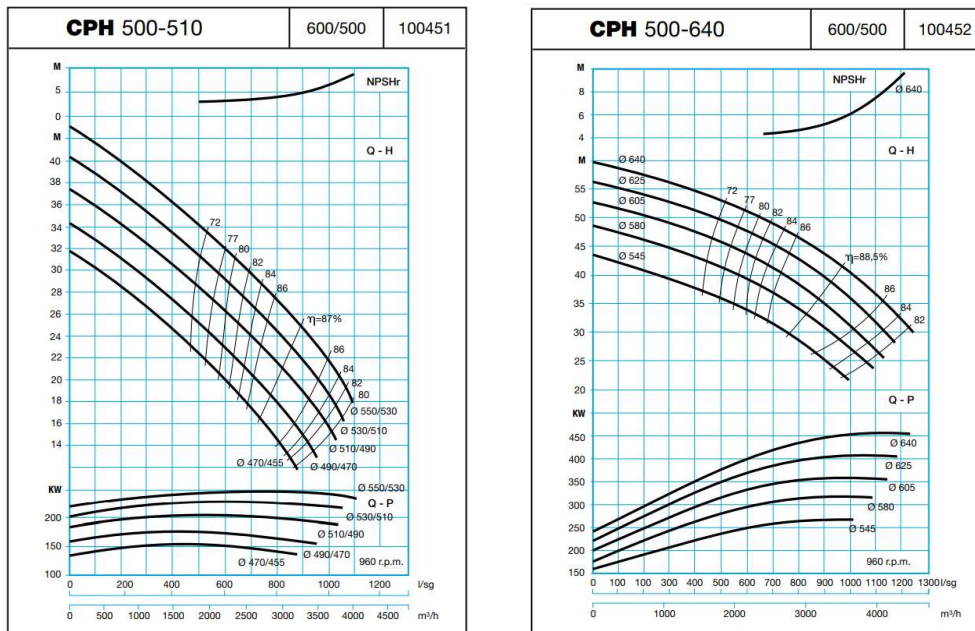


Imagen 25 - Curvas de Bombas Analizadas (<https://www.bombasideal.com/>)

Sin embargo, como podemos ver, los diámetros de los rodets de estas bombas son mucho mayores que el de las bombas en estudio (415mm). Para poder evaluar si estas bombas son semejantes a las bombas en estudio calcularemos la velocidad específica de las mismas, n_s , es decir tanto de la bomba que estamos estudiando como de las opciones elegidas, según:

$$n_s = n * Q^{1/2} * H^{-3/4}$$

Todos los cálculos se realizarán en el punto óptimo de funcionamiento, presentándose los resultados en la **Tabla 4 – Comparación de velocidades específicas**.

	Bomba	n_s
1	CPN 400-400 (emplazadas en La Picacita)	62.61
2	CPH 500-510 ($\phi = 470mm$)	100.88
3	CPH 500-640 ($\phi = 545mm$)	64.86
4	CPH 200-420 ($\phi = 320mm$)	91.96

Tabla 4 – Comparación de velocidades específicas

Se concluye que la bomba CPH 500-640 es semejante a la bomba CPN 400-400. Entonces se usará la curva de esta bomba para modelar la curva de bomba CPN 400-400.

El desarrollo de estas curvas se encuentra en el Anexo **A.3. Desarrollo de la Curva de la Bomba CPN 400-400**. El resultado obtenido se muestra a continuación en la **Imagen 26 – Curvas Bomba CPN 400-400** :

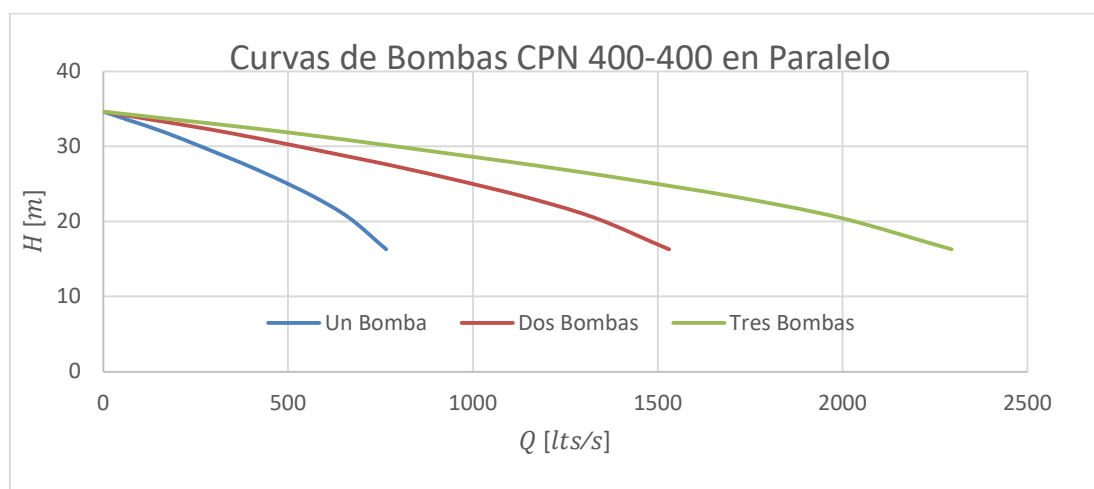


Imagen 26 - Curvas Bomba CPN 400-400

4.4.2. Curvas del Sistema

Como se detalló en la sección **4.2. Relevamiento de las Instalaciones**, y como se observa en la **Imagen 16 – Vista en Planta Central de Bombeo**, la configuración del sistema de una bomba, dos bombas y tres bombas es diferente en la sección de succión (las Bombas I y III poseen un codo a 90° adicional) y los primeros metros hasta el manifold (las Bombas II y III poseen una curva a 45° y tubería de diámetro 400mm adicional). Por esta razón fue necesario confeccionar curvas del sistema diferentes para el caso de operación de la Bomba III y para el caso de todas las BOMBAS en funcionamiento.

Se utilizará la ecuación:

$$H_N = \sum H = \left(\frac{p_2}{g\rho} - \frac{p_1}{g\rho} \right) + \left(\frac{\bar{c}_2^2}{2g} - \frac{\bar{c}_1^2}{2g} \right) + H_B + \sum H_{rs}^i + \sum H_{rp}^i$$

Hipótesis

- La altura bruta es la misma para el caso de las tres bombas y su valor es:

$$H_B = 23.55 \text{ m}$$

- Los puntos 1 y 2, se consideran en correspondencia con la reja de la cámara de succión y en la sección dónde se obtuvieron los caudales en el canal secundario respectivamente;
- $p_1 = p_2 = p_{atm}$;
- El nivel de la cámara de succión, dado su tamaño, se mantiene constante. Entonces la velocidad $\bar{c}_1 \cong 0$, de dónde se desprende que $\bar{c}_1^2 \cong 0$;
- La velocidad \bar{c}_2 será en el punto de toma de caudales en el canal secundario;

El desarrollo de las curvas del sistema se encuentra en **A.5. Desarrollo de Curvas del Sistema**.

$$H_N^{BIII} = 23.551 \text{ m} + 5.6602 * \frac{s^2}{m^5} * Q^2 \quad (14)$$

Y

$$H_N^{BI+BII+BIII} = 23.7956 \text{ m} + 3.1149 * \frac{\text{s}^2}{\text{m}^5} * Q^2 - 0.0954 \frac{\text{s}}{\text{m}^2} Q \quad (15)$$

Y el gráfico asociado se muestra a continuación en la *Imagen 27 – Curva del Sistema y Curvas Características para tres bombas*.

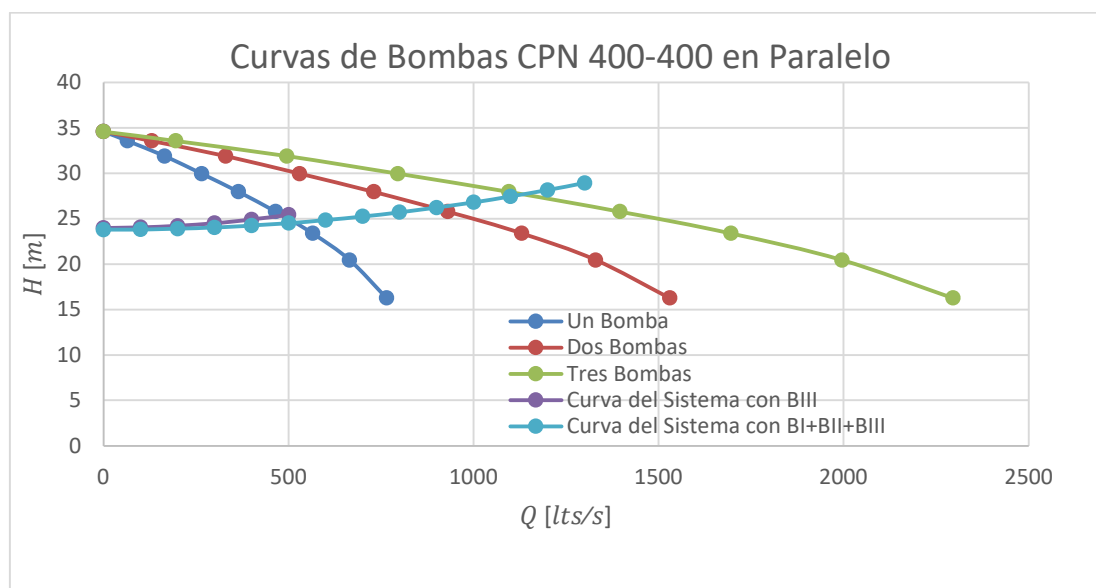


Imagen 27 - Curva del Sistema y Curvas Características para tres bombas

El punto de funcionamiento para tres bombas al mismo tiempo, se da en correspondencia con $Q_{BI+BII+BIII} = 1.133 \text{ m}^3/\text{s}$ y el punto de funcionamiento para la bomba III solamente se da para $Q_{BIII} = 0.498 \text{ m}^3/\text{s}$. Estos valores se encuentran muy próximos a los obtenidos por el aforo de EVARSA. Corresponde hacer una aclaración de las razones por las cuales se pueden dar estas diferencias.

En primer lugar, dado que la metodología requiere que el área transversal al canal secundario sea dividida en celdas (con alturas entre 0,25-1,00 m), la obtención del caudal se ve altamente influenciado por la caracterización de estas; y si bien la empresa no lo detalla en su informe, las áreas donde la profundidad era menor a 0,25 m no se realizó la medición. Es por esta razón que, se puede explicar que los caudales obtenidos por las mediciones sean menores a los hallados de manera teórica. Además, también tiene sentido que esta influencia sea mayor cuando el caudal es menor, ya que la superficie descartada es mayor porcentualmente cuando el caudal es menor en un canal con geometría trapezoidal.

Otra razón es que las curvas de las bombas fueron obtenidas a partir de otras, pertenecientes a bombas con una velocidad específica cercana, pero no exactamente la misma.

Finalmente, el hecho de que los coeficientes de pérdidas utilizados, tanto para localizadas como distribuidas, son genéricos y su aproximación puede presentar pequeñas diferencias con los mecanismos de pérdida de carga reales.

Podemos concluir que, tanto las curvas del sistema como las correspondientes al funcionamiento de las bombas, representan dentro de márgenes aceptables, el funcionamiento del sistema de bombeo.

El resultado obtenido brinda a los usuarios de estas bombas, modelo CPN 400-400, una herramienta importante para futuros desarrollos. En tal sentido se pueden utilizar las curvas aquí generadas, como punto de partida para reemplazar las bombas existentes o analizar una ampliación en el sistema de bombeo.

5. IDENTIFICACIÓN DE FALLAS

5.1. Deficiencias del Sistema de Bombeo

Las mismas fueron identificadas por los operarios y los productores, entre ellas se destacan:

1. La Estación de Bombeo no proporciona el Caudal Requerido por el Sistema

Como se detalla en la sección anterior, el sistema de bombeo, como así cada una de las bombas, no proporciona el caudal nominal indicado en la placa de la misma.

Tal lo señalado, el sistema de bombeo abastece a productores de la zona. Corresponde enfatizar que los que tienen una injerencia en las decisiones sobre la operación del sistema de bombeo, constantemente reclaman a la autoridad de regulación que se enciendan las tres bombas, dado que tienen la creencia de que el caudal que se erogará será la suma algebraica de los caudales nominales, $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$.

2. Ruido y Vibraciones

Las paradas programadas en la estación de bombeo, se realizan en el período comprendido entre los primeros días de Mayo hasta los primeros días de Noviembre. Durante la operación, es común aumento de ruido y vibraciones en las bombas. Esto se relaciona con:

- I. Excesivo desgaste y falta de material en los rodetes;
- II. Deterioro de rodamientos;
- III. Desgaste de camisas y empaquetaduras;

3. Desgaste excesivo y constante en el rodete;

4. Envejecimiento de los motores eléctricos;

5. Exceso de arena en la descarga;

6. No se cuenta con información confiable de la bomba:

Resulta evidente de los emergente planteados, que el daño por cavitación es el que genera mayores inconvenientes, dado su alto costo y tiempo de reparación. Nos centraremos en este fenómeno en primera instancia.

5.2. Análisis de Fallas

Como metodología se realizará un análisis en tres etapas.

En la primera etapa analizará el daño en los rodets, los cuales son principalmente por pérdida de material, generando desbalanceo, ruido, vibraciones, pérdida del perfil de las palas, excesivos costos de reparación y principalmente pérdida de performance del equipo. Dentro de esta etapa se pueden englobar los ítems 1, 2, 3 y 4 analizados anteriormente. Como desarrollaremos a continuación la pérdida de material es característico del fenómeno de Cavitación.

En la segunda etapa analizaremos la presencia de arena en la descarga. Centrando el análisis en los efectos que causa la presencia de esta en el flujo.

Finalmente, se analizará la sinergia entre el fenómeno de cavitación y presencia de partículas abrasivas en el flujo.

6. ANÁLISIS DE CAVITACIÓN

6.1. Análisis Morfológico

Podemos observar que el daño por cavitación en los impulsores no es generalizado, sino que se localiza sistemáticamente, año a año y en todos los rodets, en la misma ubicación (ver *Imagen 29 – Relevamiento Admisión de Rodetes*).

Al realizar un análisis visual para detallar la forma y ubicación precisa del daño, se observa que en la salida del impulsor (ver *Imagen 28 – Relevamiento Descargas de Rodetes*), no presentan más que pérdida del recubrimiento epoxi, no evidencia desprendimiento ni pérdida de material base. Más adelante se analizará la presencia de partículas abrasivas en el agua.



Imagen 28 - Relevamiento de Descargas de Rodetes

Cuando se analizan la entrada del impulsor se observa, pérdida de material base, en correspondencia con la zona de baja presión cerca a la llanta:





Imagen 29 - Relevamiento de Admisión de Rodetes

Esquemáticamente la ubicación del daño, se puede observar en las siguientes imágenes:

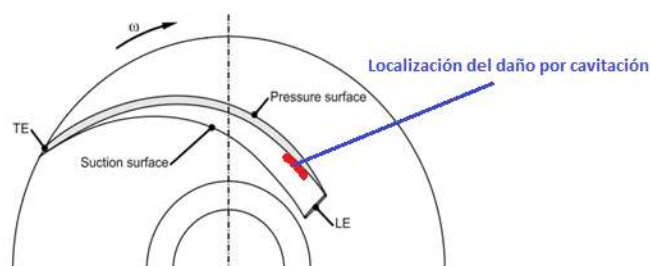


Imagen 30 - Ubicación del Daño (corte transversal) [1]

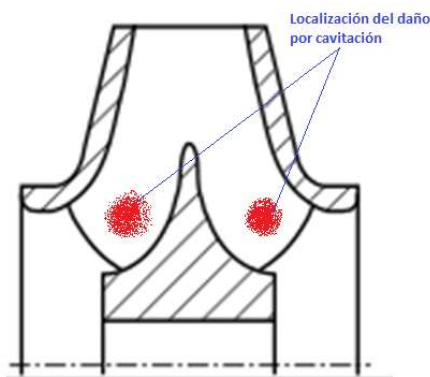


Imagen 31 - Ubicación del Daño (corte longitudinal) [1]

Para medir de manera más precisa el desprendimiento de material, se procedió a arenar un impulsor con el fin de determinar y analizar la geometría/tamaño del daño (ver *Imagen 32 – Daño por Cavitación en Rodete Arenado*). El procedimiento de arenado se utilizó solamente para limpiar el material base de herrumbre, pintura epoxi y toda partícula extraña, sin pretender ninguna rugosidad en específico.



Imagen 32 - Daño por Cavitación en rodete arenado

Una vez determinada la ubicación y geometría del daño se evaluaron posibles causas y analizando la incidencia de cada una de ellas sobre el resultado.

Se determinó que el patrón de daño es pérdida de material, con tamaño que oscila entre decimas hasta el milímetro de diámetro.

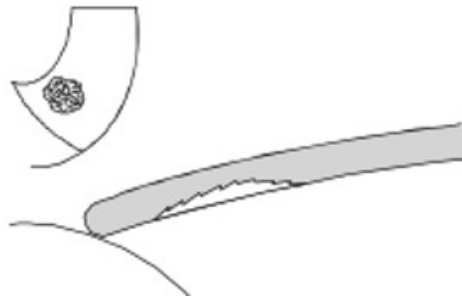


Imagen 33 - Ubicación Daño por Cavitación Detallado por Gülich [1]

La ubicación es cercana al anillo exterior o llanta de la bomba, en ambos ingresos del impulsor (ver *Imagen 33 – Ubicación Daño por Cavitación Detallado por Gülich [1]*).

En un primer análisis podríamos inferir que el daño es característico, localizado y circular, típico al generado por cavitación. Además, se ubica en la entrada del rodete, cerca del borde de ataque y del lado de baja presión de la pala.

6.2. Identificación del Origen de la Cavitación

Es habitual el análisis comparando los parámetros $NPSH_r$ (como ya establecimos ese valor es $NPSH_{3\%}$) y $NPSH_d$, y si $NPSH_r > NPSH_d$ declaramos la presencia del fenómeno de cavitación. El principal inconveniente radica en no contar con documentación de la bomba, especialmente el $NPSH_{3\%}$, para evaluar la relación entre este y el $NPSH_d$.

Para determinar el origen de la cavitación, se analizará bajo qué circunstancias de diseño, emplazamiento o de operación, puede ocurrir el fenómeno y contrastar con la información disponible.

Gülich [1] establece que, dados el patrón de geometría y ubicación, el daño se debe a que, para el caudal másico que pasa por la bomba, el ángulo de incidencia es distinto de cero y que el borde de ataque del perfil no es el adecuado para el flujo que lo recorre, al menos en el ingreso. Esto significa que el agua cuando ingresa a la pala lo hace generando un choque. Para Gülich el hecho de que el daño ocurra cerca del anillo exterior o cerca del cubo interior, indica que el choque generado en el ingreso de la pala es debido a que el ángulo con que ingresa el agua es mayor o menor al ángulo de la pala respectivamente.

Con referencia al ángulo de entrada al rodete, es importante y necesario diferenciar entre el ángulo geométrico de la directriz en entrada de la paleta β_{1B} y el ángulo de entrada del flujo de agua β_1 (*Imagen 34 – Borde de Ataque de la Pala*). El primero, β_{1B} , es una medida geométrica de la inclinación de la paleta y la dirección de la velocidad u_1 ; mientras que β_1 es el ángulo en entrada del flujo de agua a la pala, dicho de otra manera es el ángulo que forma la velocidad relativa del agua en la entrada al rodete, w_1 , con la velocidad absoluta del alabe a la entrada del rodete, u_1 . La diferencia entre ambos ángulos es la denominada incidencia sobre la pala, i_1 :

$$\beta_{1B} = \beta_1 + i_1 \quad (16)$$

Otro aspecto importante a analizar es, que tanto el ángulo β_{1B} como el β_1 no se mantienen constantes, sino que varían en función de r_{imp} , que no es más que el radio del rodete. Dicho de otra manera, $\beta_{1B}(r_{imp})$ y $\beta_1(r_{imp})$ serán función de la distancia al centro del impulsor (ver *Imagen 35*), pero la incidencia debe mantenerse lo más cerca a cero posible para que no existan choques en la entrada y no se generen zonas de baja presión debidas al desprendimiento de la capa límite.

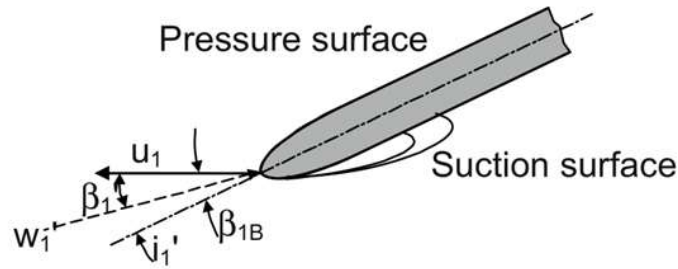


Imagen 34 - Borde de Ataque de la Pala [1]

El autor en sus estudios determinó que, dada la ubicación del daño, este se debe a que el agua ingresa generando choque. Específicamente, se debe a que el caudal que está manejando el equipo está por debajo de un caudal que denomina caudal sin choque, Q_{SF} :

$$Q < Q_{SF} \quad (17)$$

Y explica que cuando el ángulo de incidencia es muy grande se produce un desprendimiento de la capa límite, generando una zona de baja presión, donde la misma es menor a la p_v generando condiciones para que se produzca cavitación. Además, determinó que en estos casos se puede mitigar los efectos de la cavitación, modificando algunos parámetros al ingreso. Las posibles soluciones son:

- Reducir el ángulo de entrada del alabe;
- Mejorar el perfil del borde de ataque en la superficie de succión;
- Reducir incidencia mediante anillo de entrada;
- Reducir diámetro de entrada del impulsor;
- Aumentar pre-rotación;
- Funcionamiento a Mayor Caudal;

Todas las soluciones que ofrece el autor tienen como única finalidad lograr que la incidencia, i_1 , sea lo más cercana a cero posible.

Si el autor plantea como punto de partida la condición, $Q < Q_{SF}$, se deduce como consecuencia que la bomba está operando con un caudal Q que es menor a un caudal umbral, denominado caudal SIN CHOQUE Q_{SF} (Shockless Flow por sus siglas en inglés). Entonces si observamos las posibles soluciones, vemos que las primeras cinco aplican modificaciones estructurales sobre la bomba, tanto sobre el rodete como sobre la voluta, para garantizar que el flujo de agua ingrese sin generar choque. En cambio, la propuesta de mejora número seis,

considera directamente un parámetro operativo que es el caudal Q , haciendo que este sea mayor al umbral.

Como corolario del análisis realizado, se concluye que cuando una bomba opera por debajo de determinado caudal, manteniendo constante la velocidad de giro del rodete, como así también todos los parámetros geométricos, aparecen en el alabe zonas de baja presión en las que se genera cavitación.

Breugelmans y Sen [4] en su trabajo PREROTATION AND FLUID RECIRCULATION IN THE SUCTION PIPE OF CONTRIFUGAL PUMPS explican cómo, cuando el flujo se reduce por debajo de cierto valor, este se torna tridimensional en esa sección. Como consecuencia una componente negativa aparece en la parte exterior del diámetro (Flujo en Reversa o Contra Flujo).

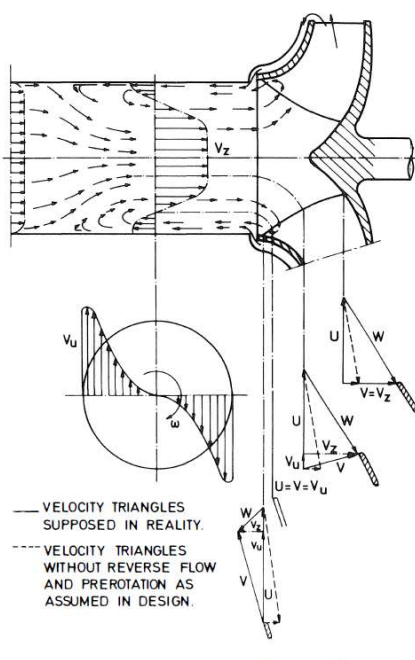


Imagen 35 - Flujo en Reversa o Contraflujo, página 166 [4]

El flujo en reversa y la pre-rotación, causan un cambio en los triángulos de velocidades a la entrada del rodete. Como se puede ver en la *Imagen 35*, la velocidad tangencial $u_1(r_{imp})$ no varía en función del caudal que pasa por el impulsor, y solo depende de r_{imp} . Pero tanto las velocidades relativas y absolutas, además de variar con r_{imp} , son función del caudal Q .

Se debe considerar que el fluido sigue la trayectoria en la que encuentra menos resistencia para ingresar a rodete. De esta manera, el fluido adquiere una componente tangencial que tiene

el mismo sentido que la rotación del impulsor a flujos menores que el nominal, para ingresar al canal del impulsor con un ángulo β_1 igual al correspondiente de la pala β_{1B} . Una componente tangencial opuesta es requerida para caudales mayores al nominal.

El flujo en la admisión se vuelve asimétrico, cuando el flujo en reversa aparece. Se atribuye esta condición a la propia asimetría en la distribución de presiones.

La intensidad del flujo en reversa es función, además de los parámetros operativos, de parámetros geométricos, como número de palas, diámetro de entrada del rodete y diámetro del anillo de la voluta.

Un trabajo desarrollado por Murakama y Heya [5] “*Swirling Flow in Suction pipe of Centrifugal Pumps*” (“Flujo giratorio en tubería de succión de bombas centrífugas”), desarrolla el criterio bajo el cual se inicia el Flujo en Reversa, y cuando este se vuelve un problema. Y encuentra que esta condición se produce para un caudal crítico, Q_{cr} :

$$Q_{cr} = 0.86 * Q_n \quad (18)$$

Otros investigadores como Ferrini [6], Schiavello [7] y Sen [8] trabajaron en bombas similares en las que solo difería el número de alabes, y encontraron que cuando $Q/Q_n = 0.5 - 0.62$ el flujo en reversa ocupa el 40% del área de entrada.

Si bien los resultados de las investigaciones no siempre llegan a los mismos resultados, todos concluyen que cuando el caudal disminuye por debajo de cierto umbral, el flujo se torna tridimensional con zonas de baja presión favoreciendo, en algunos casos, un flujo en reversa.

6.3. Comparación entre parámetros de la estación de Bombeo La Picacita y el origen de la Cavitación

En la sección 6.2. se estableció un criterio bajo el cual, el daño que se observa en la central de bombeo puede ser evaluado. Esto es, que si $Q_{cr} > Q$ se generarán zonas de baja presión dentro del rodete, en las cuales puede generarse daño por cavitación compatible con el observado.

Como ya se planteó precedentemente, la estación de bombeo fue diseñada para operar con dos bombas en funcionamiento y una bomba en reserva. Pero lo habitual es que las tres bombas estén operando en simultaneo. Por esta razón consideraremos como caudal total del sistema Q_T ,

el que se obtiene a partir de la ecuación (15), para las tres bombas en funcionamiento sin reserva, y que queda identificado en la *Imagen 29 – Curva del Sistema y Curvas Características para tres bombas*, el cual es:

$$Q_T = 1.13 \text{ m}^3/\text{s}$$

Si bien como ya explicamos anteriormente, existe una pequeña diferencia entre las pérdidas de carga en las tres bombas, consideraremos con una apreciación apta para el propósito que:

$$Q_T = Q_{BI} + Q_{QII} + Q_{BIII} \cong 3 * Q$$

De esta manera el caudal de operación de cada bomba es:

$$Q = \frac{Q_T}{3} = \frac{1.13 \text{ m}^3/\text{s}}{3} = 0.377 \text{ m}^3/\text{s}$$

Además, es necesario establecer Q_{cr} :

$$Q_{cr} = 0.86 * Q_n = 0.86 * 0.500 \text{ m}^3/\text{s} = 0.430 \text{ m}^3/\text{s}$$

Como se puede observar, se cumple la condición $Q_{cr} > Q$. Por esta razón cuando las tres bombas operan en simultaneo, se generan las condiciones para que aparezcan los fenómenos explicados anteriormente, y que dan origen a zonas de baja presión que favorecen la cavitación.

7. ANÁLISIS DEL DESGASTE ABRASIVO POR LA PRESENCIA DE ARENA EN EL FLUJO

Otro de los problemas que se pudo identificar en la central de bombeo es la presencia excesiva de arena, tanto en la cámara de succión (*Imágenes 14 y 15*) como en la descarga (*Imagen 17*). Resulta menester aclarar, que no cuenta con desarenador. En tal sentido al analizar el plano Lp-eb-02m, perteneciente al proyecto original, se visualiza que no estuvo contemplado un desarenador en la obra de toma sobre el canal principal. No se tiene información en relación a la decisión indicada. También corresponde aclarar que no se cuenta con el proyecto completo, solamente con la planimetría.

Además de observar presencia de bancos de arena en los lugares descritos, se identifican desgaste por abrasión en la voluta inmediatamente después de la salida del rodete *Imagen 36* y en los impulsores *Imagene 37 y 38*.



Imagen 36 - Daño por Presencia de Partículas Abrasivas en la Voluta



Imagen 37 - Daño por Presencia de Partículas Abrasivas en la Voluta

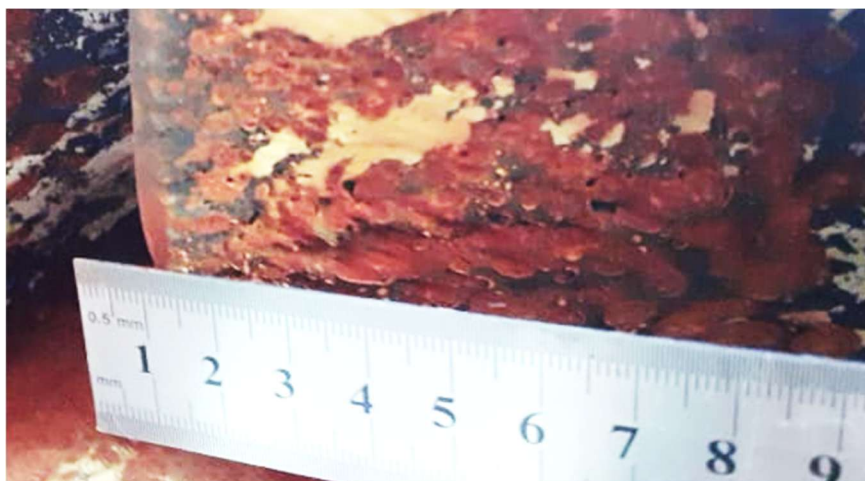


Imagen 38 - Daño por Presencia de Partículas Abrasivas en el Rodete

A diferencia del caso con la cavitación, aquí tenemos evidencia concreta de la presencia de arena y del consecuente desgaste abrasivo, característico por la morfología caracterizada por acanaladuras en el material base.

8. SINERGÍA ENTRE CAVITACIÓN Y PRESENCIA DE PARTÍCULAS ABRASIVAS

Debemos analizar, dado que existe CAVITACIÓN y presencia de PARTICULAS ABRASIVAS, la interacción entre estos dos fenómenos.

La acción sinérgica emergente, no solo provoca pérdida de material, sino también en el aumento de las vibraciones y ruido del equipo.

8.1. Descripción del Fenómeno Microscópico

El fenómeno microscópico puede dividirse en dos categorías dependiendo del objetivo de la investigación: **Comportamiento de Partículas** (incluye dirección del movimiento, rotación propia, aceleración, etc.) y **Comportamiento de la Burbuja** (incluye la nucleación, colapso esférico, flujo del jet/onda de choque, etc.).

En primera instancia se debe analizar si existe alguna relación entre la formación de burbujas y la presencia de partículas en el flujo; la respuesta es sí, y que se fundamenta a continuación.

Según la investigación de CHANG [9] “*Cavitation and cavitation erosion of pump and turbine with silt-laden water as working médium*” existe la posibilidad, dado el tipo de partículas, que núcleos de gas queden atrapados por capilaridad entre las grietas de las partículas. Y cuando disminuye la presión por debajo de cierto valor estos núcleos se expanden, adhieren e incluso se separan de la superficie de las partículas.

Esta dinámica puede observarse en la *Imagen 39 – Formación de Burbuja a partir de una Partícula Sólida Aislada, [10, p5]*, que se presenta a continuación , la misma parte del estudio de CHANG con una cámara de ultra alta velocidad.

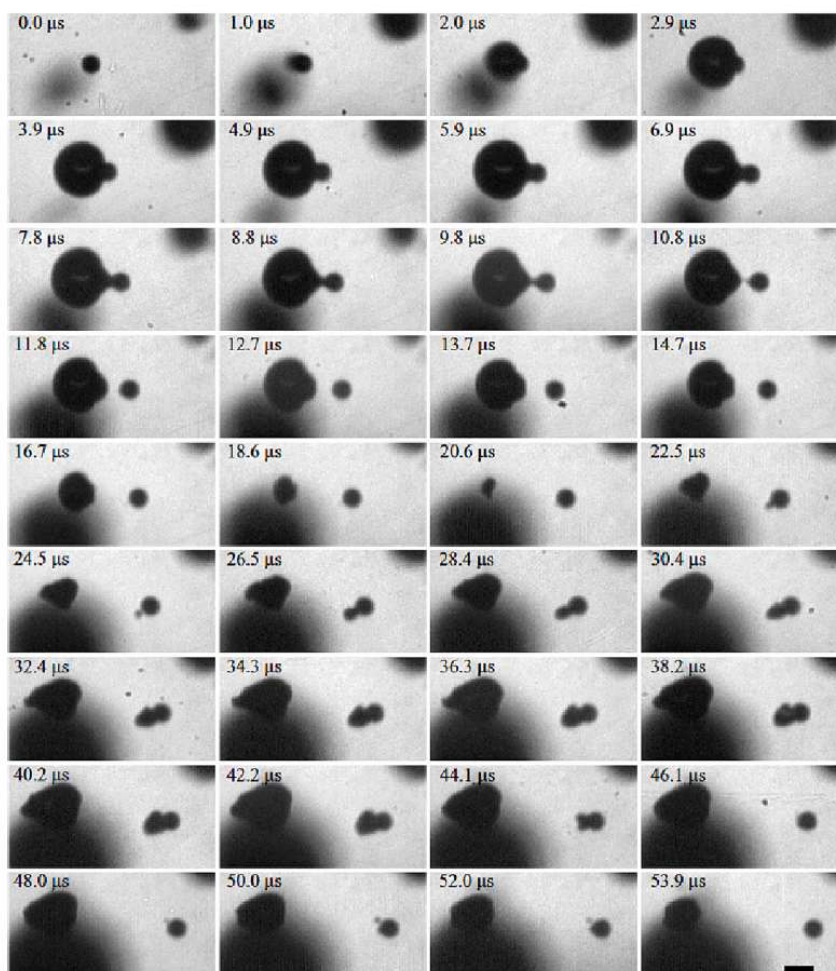


Imagen 39 - Formación de Burbuja a partir de una Partícula Sólida Aislada, [10, p5]

Se observa que entre el segundo inicial y el $4,9 \mu\text{s}$ se produce la aparición y un rápido crecimiento de la burbuja sobre la superficie de la partícula. Luego entre $4,9 \mu\text{s}$ y $10,8 \mu\text{s}$ se observa la formación de un cuello y la burbuja se separa de la partícula. Y finalmente, después de $10,8 \mu\text{s}$ la burbuja colapsa, seguido de una expansión secundaria.

El mecanismo detrás de la formación y colapso de las burbujas en la superficie de las partículas es atribuido, como ya se explicó, a la presencia de gas en las grietas de la partícula por acción capilar. Si las partículas poseen una geometría rugosa y son hidrofóbicas, hay una tendencia a que quede atrapado gas en sus grietas, mientras que si las partículas presentan geometrías suaves e hidrófilas no.

Algo importante a notar, es que el movimiento de la partícula es independiente de causas externas, y solo influye en él la ubicación y tamaño del núcleo de cavitación que se formó en su superficie.

Corresponde destacar, que durante el proceso de colapso de la burbuja influye directamente en las partículas que la rodean, induciendo en ellas un cambio de dirección y/o aceleración.

La mecánica de la relación del movimiento entre la partícula y la burbuja, puede dividirse en tres etapas:

- Generación de la Burbuja, dónde el crecimiento de la misma sobre la superficie de la partícula genera en ésta un movimiento (Movimiento de Repulsión);
- Colapso de la Burbuja, debido al cambio en la forma de la superficie de esta, de esférica a no esférica (Movimiento de Atracción);
- Atracción de Partículas a medida que se acercan a la burbuja mientras colapsa (Movimiento de Atracción);

Estudios determinan que si analizamos el parámetro $NPSH_i$, que cuantifica el inicio de la cavitación, este valor se reduce entre un 10% – 15% en flujos con presencia de partículas con respecto a un flujo de agua limpia.

La aceleración de la partícula es más compleja de explicar, ya que depende de factores como la ubicación de la misma (si se encuentra entre la burbuja y la superficie del material o si es la burbuja la que se encuentra entre la partícula y la superficie del material), el tamaño de la partícula, la cantidad de sedimento, entre otros. De todas maneras, se puede analizar las causas que, desde un punto de vista microscópico, aceleran a las partículas:

- Colapso de la Burbuja: Se produce una gran aceleración de la partícula como consecuencia del colapso de la burbuja;
- Crecimiento de la Burbuja: Debido La partícula se moverá en dirección opuesta a este crecimiento, luego del corte del cuello de la burbuja, y como resultante de las fuerzas que las mantenían vinculadas, la partícula experimenta una fuerza contra la superficie.

Ambas pueden observarse en la *Imagen 40 – Movimiento de la Partícula a Causa de la Burbuja, [10, p10]*.

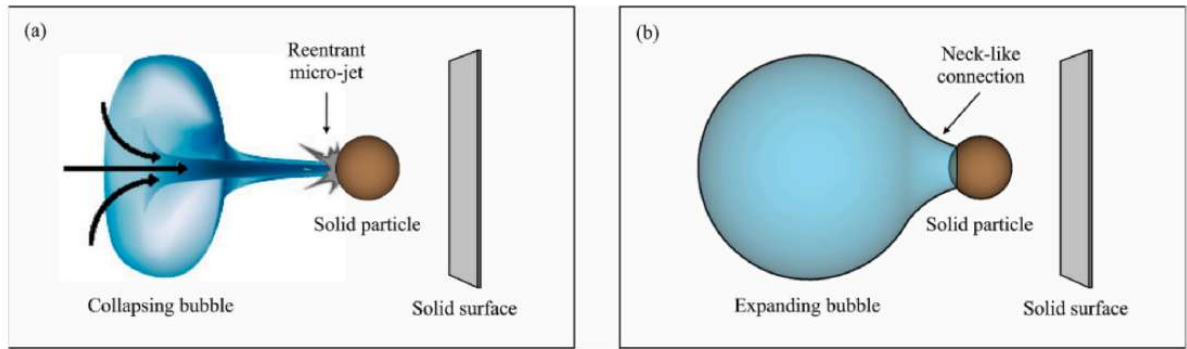


Imagen 40 - Movimiento de la Partícula a Causa de la Burbuja, [10, p10]

A su vez se pueden distinguir en el fenómeno de colapso de la burbuja, dos mecanismos (ver *Imagen 41 – Movimiento de la Partícula a Causa del Colapso la Burbuja, [10, p10]*) los cuales afectan de manera diferente a la partícula cercana y las partículas lejanas:

- Micro-Jet: este fenómeno induce una gran aceleración en la partícula cercana, la cual posteriormente impactará sobre la superficie del material;
- Onda de Choque: este fenómeno ocurre cuando la burbuja colapsa, generando una onda que no solo afecta a las partículas muy cercanas, y en dirección del micro-jet, sino también a partículas vecinas;

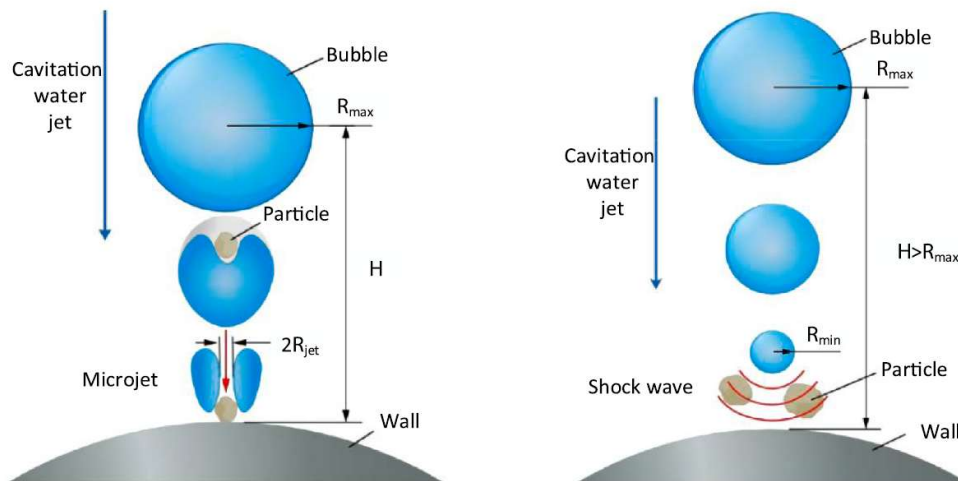


Imagen 41 - Movimiento de la Partícula a Causa del Colapso la Burbuja, [10, p10]

8.2. Análisis Macroscópico de la Sinergia

En la sección anterior se detalló la mecánica de los fenómenos de CAVITACIÓN, ABRASIÓN POR PARTICULAS y SINERGÍA entre ellos.

Cuando el fenómeno se explica de manera aislada, una partícula y una burbuja, si bien es útil para entender el fenómeno no explica en su totalidad los efectos que se observan en la realidad. Esto se puede explicar debido a varios factores que promueven o inhiben el daño que se genera por la sinergia. Algunos de estos son:

- Aporte constante y en gran cantidad de partículas abrasivas: Esto aumenta el daño causado por la sinergia entre partícula/burbuja ya que se aportan más núcleos de cavitación al sistema;
- Partículas con distinta granulometría;
- Gas disuelto en el seno del fluido;

Debido a esto es necesario analizar de manera integral el diseño de la estación de bombeo, las partículas presentes en el fluido y los parámetros operativos.

8.3. Conclusión de la Sinergia

Podemos afirmar que el desgaste generado por la SINERGÍA entre la erosión por CAVITACIÓN y abrasión por PARTICULAS, es mucho mayor que el daño generado en el caso de que estos fenómenos ocurran solos. De acuerdo a algunos autores, el daño por desgaste producido en la sinergia es 8.5 veces más grande que si solo existiera cavitación, y 3.5 veces para el caso que solo hubiera abrasión por partículas.

Además se debe considerar que la presencia de partículas, dependiendo la cantidad, forma y tamaño, reducen el $NPSH_i$ en un 10% – 15%.

9. ANÁLISIS DE TAREAS DE MANTENIMIENTO

Dado que realizar un plan de mantenimiento excede los alcances del presente documento, solamente se relevará, en general su implementación (incluyendo responsables y prácticas comunes) para identificar si las prácticas llevadas a cabo, tienen injerencia sobre alguno de los parámetros analizados

9.1. Descripción de la Gestión Actual de Mantenimiento

Como ya se dejó establecido, el personal de la estación de bombeo es el encargado tanto de la operación como del mantenimiento. Para ello, solo una parte del personal recibió la capacitación cuando se inauguró “La Picacita”, en el año 1998. Luego, fueron ellos los encargados de transmitir los conocimientos adquiridos al resto del personal.

Durante la temporada siempre hay un operario en el predio, siendo relevado cada 8hs. Tanto las tareas de mantenimiento, como las de operación, son registradas en una planilla diaria.

Cuando finaliza la temporada de riego, a mediados de Mayo, las bombas son desarmadas y el procedimiento utilizado es el siguiente:

1. Se desmonta la tapa superior aflojando los espárragos, y con ayuda de un elevador eléctrico, se retira la misma;
2. Se desarma el acoplamiento elastomérico (GUMI). Los operarios realizan una inspección visual y si no presenta grieta vuela a colocarse;
3. Se quitan las empaquetaduras. Las cuales son descartadas;
4. El impulsor es retirado y se envía a rellenar los alabes y a rectificar camisas. Las tareas de reparación son realizadas en talleres tercerizados; dada la estructura de compras y contrataciones que posee la provincia de Neuquén, no siempre son los mismos los talleres. Además, se requiere que los impulsores (sin colocarle los rodamientos) sean balanceados tanto dinámica como estáticamente;

Luego una vez reparado el impulsor, las tareas realizadas por el personal son las siguientes:

1. Se colocan los rodamientos. Por lo general luego de una temporada, y dado que por la pérdida de material en los alabes el rodete genera grandes vibraciones, se sustituyen por nuevos;
2. Se vuelven a montar los anillos de desgaste. Este caso, no existe un procedimiento de medición entre el rodete y los anillos de desgaste;

3. Se monta el rodete sobre la carcasa inferior;
4. Se colocan las empaquetaduras;
5. Se coloca la carcasa superior;
6. Se ajustan los prensa estopa. Dicho ajuste debe permitir un flujo de agua a través de las empaquetaduras para lubricarlas. Se realizó una medición del caudal de agua que fluye por cada empaquetadura utilizando un balde y un cronometro, registrándose un caudal de $1,8 \text{ lt}/\text{min}$;

10. ESTADO ACTUAL Y PROPUESTAS DE MEJORA DEL SISTEMA

10.1. Estado Actual

En primera instancia se presentará una síntesis de las problemáticas que dieron origen al presente Proyecto Integrador Profesional:

- La Estación de Bombeo no proporciona el Caudal Requerido por el Sistema;
- Ruido excesivo. Es mismo está asociado a un desgaste excesivo y constante, de los alabes del rodete. Esto genera la necesidad de una reparación a gran escala, casi con una periodicidad anual. También se debe considerar el rectificando de camisas y cambios de empaquetaduras. Rápido deterioro de rodamientos por vibraciones, que obliga al recambio anual;
- Envejecimiento de los motores eléctricos;
- Exceso de arena en la descarga;
- No se cuenta con información del fabricante de las Bombas;

Dado que no se contaba con información del fabricante, como ya se dejó en claro precedentemente, se procedió a contratar una empresa para tomar mediciones de caudal, los cuales se analizaron (*4.4.2. Medición de Caudal*) y utilizaron como primeras aproximaciones. Además, tomando la curva de una bomba que actualmente se encuentra en producción, analizando el número de revoluciones e infiriendo condiciones de semejanza, se construyeron curvas para las bombas bajo análisis (*4.4. Curva Característica de la Bomba*). Luego de construir las curvas del sistema correspondiente, se concluyó que con la aplicación del procedimiento aplicado, se logró caracterizar con una adecuada precisión, al mismo con sus bombas las bombas. Dichas curvas podrán ser utilizadas por el personal de la estación.

Un análisis posterior, sobre las curvas obtenidas y los caudales medidos, arroja que la estación de bombeo suministra, con dos bombas en funcionamiento y una de reserva, el caudal para el cual fue diseñada dentro de márgenes aceptables (cercano al $0,9 \text{ m}^3/\text{s}$ según *Imagen 27 – Curva del Sistema y Curvas Características para tres bombas*). Es por esto que podemos decir que si el caudal que se requiere para el sistema de riego es mayor, debe ampliarse la capacidad de este sistema y **no ponerse en funcionamiento la bomba de reserva**.

Se entiende como un hecho a destacar, y que surgió como un emergente del trabajo realizado, que la presencia de arena contribuye de manera categórica al fenómeno de cavitación mediante el aporte de núcleos de gas atrapados en las partículas, tal como se analizó en la sección **8**.

Sinergia entre Cavitación y Presencia de Partículas Abrasivas, reduce el $NPSH_i$ en un 10% – 15%. El exceso de arena en el sistema se debe a que, como se explicó en la sección *7. Análisis del Desgaste Abrasivo por Presencia de Partículas Abrasivas*, la estación de bombeo no cuenta con un desarenador, razón por la cual la propia obra de toma en sí actúa sobre el flujo disminuyendo la velocidad y produciendo la decantación de partículas, que son succionadas por las bombas.

Finalmente, el hecho de poner en funcionamiento la tercera bomba, produce que el caudal por bomba disminuye por debajo del valor crítico (desarrollado en *6.3. Comparación entre parámetros de la estación de Bombeo “La Picacita” y el origen de la Cavitación*), generando un flujo recirculante en el cual hay zonas de baja presión que favorecen la cavitación en esos lugares. Al existir zonas propensas a generar CAVITACIÓN y brindarle núcleos de cavitación, presentes en la arena, se produce la SINERGIA entre los fenómenos de desgaste abrasivo y cavitación, produciendo un desgaste mucho mayor que la suma de los desgastes individuales que generarían estos fenómenos por separado.

Las acciones que se proponen llevar adelante, para mitigar o inclusive eliminar las no conformidades planteadas son:

1. Durante la operación del sistema de bombeo, no deben ponerse en funcionamiento las tres bombas al mismo tiempo. Este modo de operación no suministrará el triple del caudal nominal de una bomba, y solamente se incurrirá en desgaste superlativo en el impulsor por lo desarrollado en este documento. Si se desea que el sistema erogogue un mayor caudal, debe rediseñarse la estación de bombeo actual o bien ampliarla;
2. Diseñar y Construir un desarenador que garantice la menor cantidad de partículas abrasivas, núcleos de cavitación, en la succión de las bombas. Con esto garantizaremos también, minimizar drásticamente los núcleos de cavitación, a la par de reducir el desgaste abrasivo producido por la arena;

10.2. Propuesta de Modernización del Sistema

Conforme a las conclusiones resultantes de la investigación desarrollada, se presentará una propuesta para ampliar la capacidad del sistema. Las premisas para ello serán las siguientes:

- Se seleccionarán bombas de mayor potencia, pero de dimensiones físicas similares;
- Tanto las tuberías como accesorios de succión e impulsión se mantendrán;

- Dado que el sistema ha funcionado con las tres (3) bombas en simultáneo, sin mayores inconvenientes en el sistema de alimentación eléctrica, el valor de potencia consumida deberá estar en el orden de los 480 KW;

Primero se establecerá el punto de funcionamiento, para dos bombas en simultaneo y una en reserva. Se utilizará la ecuación (14) para establecer dicho punto de funcionamiento para un $Q_n^{2bombas} = 1.1 \text{ m}^3/\text{s}$. Entonces:

$$H_N^{2bombas} = 23.551 \text{ m} + 5.6602 * \frac{\text{s}^2}{\text{m}^5} * \left(1.2 \text{ m}^3/\text{s}\right)^2 = 31.7\text{m}$$

y

$$H_B = 23.551 \text{ m}$$

Se optó por la firma WILO para la selección de las bombas, ya que dicha empresa cuenta con disponibilidad de equipos, además de contar con sede en Argentina. Esto es de gran importancia, ya que la Subsecretaría de Recursos Hídricos, al ser un ente público, para adquirir bienes, debe realizar una licitación pública. Y para ello, el proveedor de tener representación en el territorio.

Se utilizó la herramienta de selección online Select.Wilo (<https://select.wilo.com/Region.aspx?ReturnUrl=%2fStartMain.aspx>). La misma requiere para empezar la preselección del equipo, el ingreso de Altura Bruta, Altura Neta y Caudal del sistema compuesto por ambas bombas. A posteriori ofrece una serie de alternativas según el criterio seleccionado, en este caso rendimiento óptimo. Como criterio adicional se estableció que, además de que el punto de funcionamiento del sistema con dos bombas tuviera rendimiento óptimo, la alternativa de operación con una sola bomba también un rendimiento aceptable. Como se puede ver en la **Imagen 42**, la bomba seleccionada fue el modelo SCP 350/540HD-250/6-T4.

		Denominación del producto	Tiempo d...	Diseño	P:n kW
	🔊	SCP 300/400HA-250/4-T4	A petición	Bomba de cámara partida	250
	🔊	SCP 350/350HD-200/4-T4	A petición	Bomba de cámara partida	200
	🔊	SCP 350/540HD-250/6-T4	A petición	Bomba de cámara partida	250
	🔊	SCP 350/540HDC-250/6-T4	A petición	Bomba de cámara partida	250
	🔊	SCPG 500/670HD-250/8	A petición	Bomba de cámara partida	250
	🔊	SCP 350/350HDC-200/4-T4	A petición	Bomba de cámara partida	200
	🔊	SCP 300/400HA-250/4-T4	A petición	Bomba de cámara partida	250

19 registros encontrados

Imagen 42 - Selección de Bombas, Select.Wilo

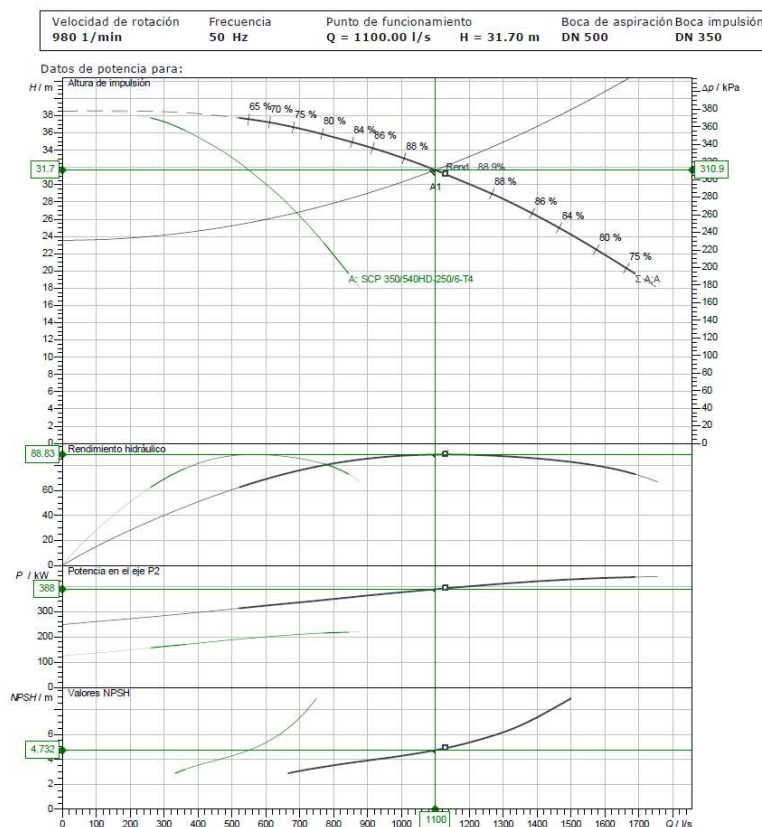


Imagen 43 - Curvas de Bombas, Select.Wilo

En la *Imagen 43 – Curvas de Bombas, Select.Wilo* se observa que, una sola una bomba en funcionamiento brinda un caudal de $0,685 \text{ m}^3/\text{s}$ con un rendimiento cercano al 87%.

Finalmente, se calcula el $NPSH_d$:

$$NPSH_d = H_{Ed} = h + \frac{(p_1 - p_v)}{\rho * g} - \sum H_{rs}^i - \sum H_{rp}^i$$

El valor de h se obtiene de la *Imagen 15 – Vista en Corte Cámara de Succión* obteniendo $h = 0.99\text{m}$. La presión de saturación de vapor es $p_v(15^\circ) = 1.7057\text{m}$. La presión en 1 es la atmosférica, $p_1 = 101,325 \text{ KP}$. Finalmente, las pérdidas localizadas y distribuidas se determinan a continuación.

El sistema se constituye de la siguiente manera (ver *Imágenes 15 y 16*): ensanchamiento al ingreso ($\zeta_{670-500}$), curva a 90° diámetro 500mm ($\zeta_{Codo 90}$), curva a 90° diámetro 500mm ($\zeta_{Codo 90}$), válvula mariposa tipo wafer 500mm ($\zeta_{V.Marip}$):

$$\sum H_{rs}^i = (0,12 + 0,10 + 0,10 + 0,20) * \left(\frac{Q}{\pi * (0.25 \text{ m})^2} \right)^2 \frac{1}{2g} = 0.323\text{m}$$

$$\sum H_{rp}^i = \lambda_{\phi 500} \frac{L}{\phi} \frac{c^2}{2g} = 0.516m$$

Entonces:

$$NPSH_d = 0.99m + 8.62m - 0.323m - 0.516 = 8.774m$$

De la *Imagen 43* se desprende que, para una sola bomba en funcionamiento con un punto de funcionamiento en $Q = 0,685 \text{ m}^3/\text{s}$ y $H_N = 26.8m$, el $NPSH_r = 7.8m$ es menor al $NPSH_d$, lo que significa que la energía a la entrada de la bomba, $NPSH_d$, es mayor a $NPSH_r$. Se analizó el caso para una sola bomba, ya que es el caso crítico, porque el caudal que atraviesa la porción de tubería con sus accesorios es mayor que en el caso de dos bombas. Además, se observa que el punto de máximo rendimiento para una sola bomba se encuentra en $Q_n = 0,580 \text{ m}^3/\text{s}$, obteniendo por la ecuación (18) $Q_{cr} = 0,499 \text{ m}^3/\text{s}$, cuando las dos bombas estén en funcionamiento el caudal por bomba será $Q = 0,550 \text{ m}^3/\text{s} > Q_{cr}$, por lo cual podemos asegurar que no existirá un flujo en reversa que genere zonas de baja presión.

La única modificación que hay que realizar sobre el sistema, viene dada por la diferencia de diámetros de las bridas de salida de las bombas. Los modelos CPN 400-400 poseen diámetro de salida de $400mm$, mientras que la bomba SCP 350/540HD-250/6-T4 posee un diámetro de salida de $350mm$. Conforme a lo señalado, resulta necesario reemplazar el ensanchamiento que actualmente poseen las bombas a la salida, que es de $400mm - 500mm$, por uno de $350mm - 500mm$.

11. CONCLUSIONES

El presente Proyecto Integrador Profesional concluyó de manera exitosa, pudiéndose cumplir en su totalidad los objetivos propuestos. Durante el desarrollo, fue necesario tomar contacto con operarios y productores, identificando las necesidades de todas las partes que componen el sistema de riego y, con foco en ellas, ofrecer una solución que resuelva la problemática a un costo asequible.

A lo largo del proyecto se tuvo la posibilidad de explorar diferentes criterios para el abordaje de la problemática. La flexibilidad con la que fue necesaria llevar a cabo el análisis, ha resultado en un enorme enriquecimiento para mi futuro profesional. En tal sentido además de utilizar y consolidar conocimientos adquiridos en diferentes asignaturas a lo largo del cursado de la carrera, adquirí nuevos en lo que respecta al funcionamiento de sistemas de bombeo con bombas en paralelo, y en todo lo referente a la mecánica de la cavitación. Además, al no contar con información de las bombas sobre las cuales estábamos trabajando, fue necesario aplicar técnicas desarrolladas en la asignatura Máquinas Hidráulicas para confeccionar las curvas de funcionamiento correspondientes.

En particular quiero destacar, que el haber tenido la oportunidad de profundizar teórica y empíricamente en el estudio de un fenómeno tan complejo como la cavitación, significa es un gran aporte que me llevaré de este proyecto.

Considero que los resultados obtenidos son importantes y trascendentes para la Secretaría de Recursos Hídricos. En tal sentido, por un lado, las curvas obtenidas podrán ser utilizadas para evaluar el funcionamiento del sistema y/o también para reemplazar las bombas existentes; y por otro lado se brindaron los fundamentos por los cuales no resulta conducente al presente, poner en funcionamiento todas las bombas del sistema en forma simultánea.

En resumen, el desarrollo del trabajo objeto del Proyecto, permitió determinar las causas de las deficiencias operativas del sistema de bombeo y de deterioro de ciertos componentes. Además como producto de la reingeniería elaborada, se presenta una propuesta concreta de adecuación del sistema de bombeo, tanto de bombas como de su modalidad operativa, para cumplir con la demanda de riego de forma eficiente, manteniendo la mayor parte de las instalaciones.

ANEXOS

A.1. Propiedades de los Fluidos

A.2. Gráficos y Tablas para Calcular Pérdidas en Tuberías y Accesorios

A.3. Desarrollo de la Curva de la Bomba CPN 400-400

A.4. Informe Aforo realizado por EVARSA

A.5. Desarrollo de Curvas del Sistema

A.1. Propiedades de Fluidos

Temperatura [°C]	ν [centistokes]	ν [m ² /s]
0	1.792	0.000001792
10	1.308	0.000001308
20	1.007	0.000001007
30	0.804	0.000000804
40	0.661	0.000000661
50	0.556	0.000000556

Tabla 5 – Viscosidad Cinemática del Agua, Termodinámica K.Wark

Agua saturada. Tabla de temperaturas

Temp., T °C	Pres. sat., P _{sat} kPa	Pres. sat., P _{sat} m.c.a	Volumen específico, m ³ /kg		Energía interna, kJ/kg		
			Líqu. sat., v _f	Vapor sat., v _g	Líqu. sat., u _f	Evap., u _{fg}	Vapor sat., u _g
0.01	0.6117	0.0623	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9
5	0.8725	0.0889	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8
10	1.2281	0.125	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7
15	1.7057	0.174	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5
20	2.3392	0.238	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3
25	3.1698		0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1
30	4.2469		0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9
35	5.6291		0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7
40	7.3851		0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4
45	9.5953	0.978	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1
50	12.352		0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7
55	15.763		0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3
60	19.947		0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9
65	25.043		0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4
70	31.202	3.18	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9

Tabla 6 – Presión de Vapor del Agua, Termodinámica K.Wark

A.2. Gráficos y Tablas para Calcular Pérdidas en Tuberías y Accesorios

- Válvula Mariposa Tipo Wafer $\zeta_{V.Mar.}$:

$$H_{rs} = \zeta_{V.Mar.} \frac{\bar{c}^2}{2g}$$

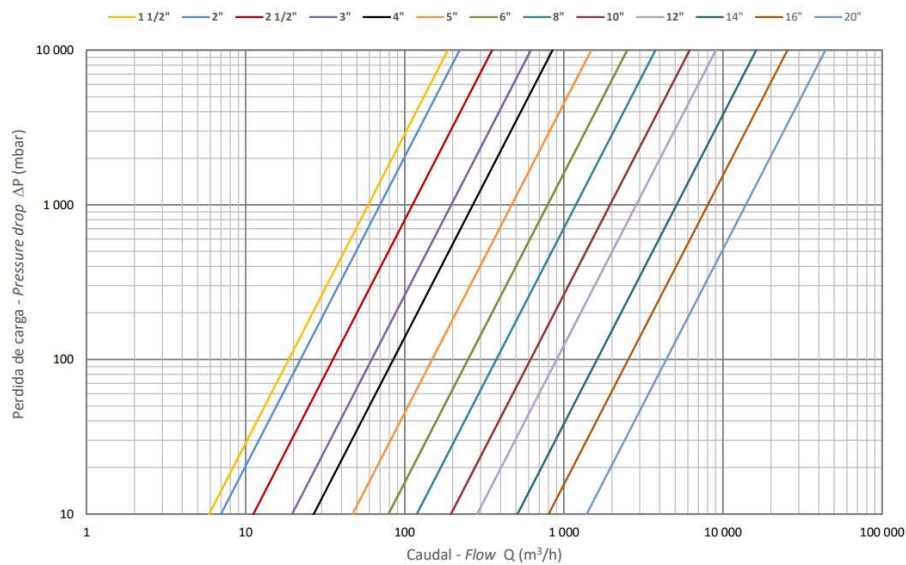
Dónde, para apertura total:

	DN200	DN250	DN300	DN350	DN400	DN450	DN500	DN600
$\zeta_{V.Mar.}$	0,42	0,33	0,33	0,23	0,23	0,22	0,20	0,18

Fuente Mecánica de los Fluidos y Máquinas Hidráulicas, Claudio Mataix, 1982.

- Válvula de Retención de Disco Partido, $\zeta_{V.DP.}$:

(Agua en flujo horizontal a 20 °C - Water in horizontal flow at 20 °C)



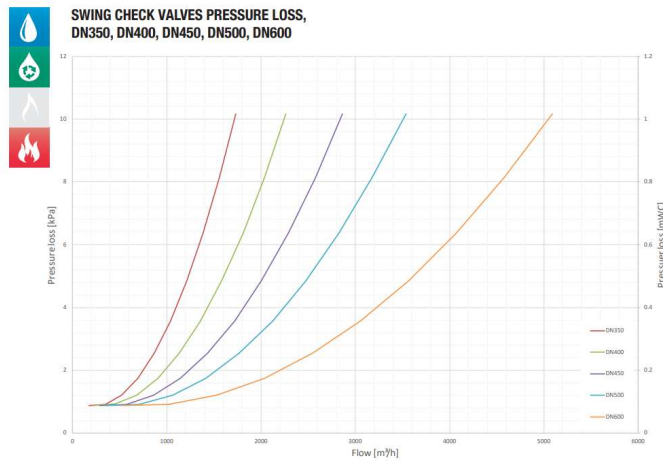
Nota: 1 mca = 100 mbar

Catálogo Atusa DS

Para el caso en estudio fue necesario encontrar una curva cuadrática que represente las caídas de carga, para una válvula DN 500, en un intervalo entre 1000 y 11000 m³/h.

$$H_{rs} = 6.48 * \frac{1}{m^4} * \frac{Q^2}{g} = 12.96 * \frac{1}{m^4} * \frac{Q^2}{2g}$$

- Válvula de Retención de Disco Oscilante o Clapeta con Amortiguador, ζ_{VDO} :



Catálogo AVK Válvulas (<https://www.avkvalvulas.com/>)

Para el caso en estudio fue necesario encontrar una curva cuadrática que represente las caídas de carga, para una válvula DN 500, en un intervalo entre 1000 y 4000 m3/h.

$$H_{rs} = 25.96 * \frac{1}{m^4} * \frac{Q^2}{2g} - 3.6 * \frac{1}{m * s} * \frac{Q}{g} + 1.2 * \frac{m^2}{s^2} * \frac{1}{g}$$

- Cambio de Dirección, $\zeta_{C.D.}$:

$$H_{rs} = \zeta_{C.D.} \frac{\bar{c}^2}{2g}$$

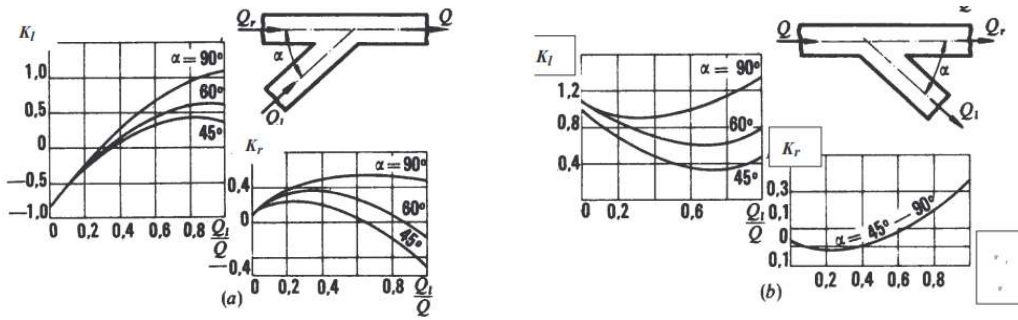
Dónde:

Figura					
$\zeta_{C.D.}$	0,5	1,0	1,5	3,0	0,05

Figura				
$\zeta_{C.D.}$	0,1	0,15	2,0	3,0

Fuente Mecánica de los Fluidos y Máquinas Hidráulicas, Claudio Mataix, 1982.

• Bifurcación y Confluencia:



Fuente Mecánica de los Fluidos y Máquinas Hidráulicas, Claudio Mataix, 1982.

Se calculan en primera instancia de forma independiente las pérdidas de energía correspondientes al caudal lateral Q_l y el caudal recto Q_r , con las ecuaciones:

$$H_{rl} = \zeta_l * \frac{c^2}{2g} \quad \text{y} \quad H_{rr} = \zeta_r * \frac{c^2}{2g}$$

Luego se suman. “c” es la velocidad de la corriente total.

• Codos y Curvas:

Tipo de accesorio	Diámetro nominal (pulgadas)									
	Roscada				Con bridas o extremo liso					
	1/2	1	2	4	1	2	4	8	20	
Codos										
45° radio corto	0.39	0.32	0.30	0.29	0.21	0.20	0.19	0.16	0.14	
45° radio largo					0.50	0.39	0.30	0.26	0.21	
90° radio corto	2.0	1.50	0.95	0.64	0.40	0.30	0.19	0.15	0.10	
90° radio largo	10	0.72	0.41	0.23	0.40	0.30	0.19	0.15	0.10	
180° radio corto	2.0	1.50	0.95	0.64	0.41	0.35	0.30	0.25	0.20	
180° radio largo					0.40	0.30	0.21	0.15	0.10	

Fuente Mecánica de los Fluidos, White, 1994.

• Expansión Gradual:

D_2/D_1	Angle of Cone, θ											
	2°	6°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	60°
1.1	0.01	0.01	0.03	0.05	0.10	0.13	0.16	0.18	0.19	0.20	0.21	0.23
1.2	0.02	0.02	0.04	0.09	0.16	0.21	0.25	0.29	0.31	0.33	0.35	0.37
1.4	0.02	0.03	0.06	0.12	0.23	0.30	0.36	0.41	0.44	0.47	0.50	0.53
1.6	0.03	0.04	0.07	0.14	0.26	0.35	0.42	0.47	0.51	0.54	0.57	0.61
1.8	0.03	0.04	0.07	0.15	0.28	0.37	0.44	0.50	0.54	0.58	0.61	0.65
2.0	0.03	0.04	0.07	0.16	0.29	0.38	0.46	0.52	0.56	0.60	0.63	0.68
2.5	0.03	0.04	0.08	0.16	0.30	0.39	0.48	0.54	0.58	0.62	0.65	0.70
3.0	0.03	0.04	0.08	0.16	0.31	0.40	0.48	0.55	0.59	0.63	0.66	0.71
∞	0.03	0.05	0.08	0.16	0.31	0.40	0.49	0.56	0.60	0.64	0.67	0.72

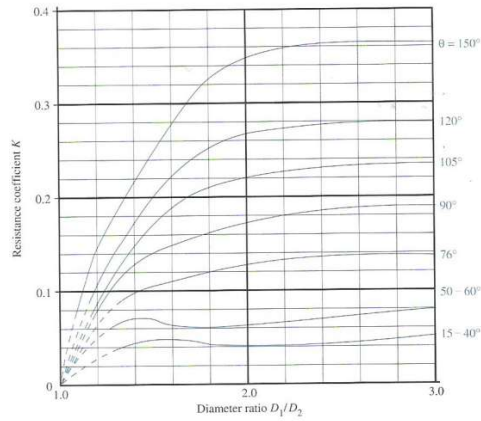
Source: King, H. W., and E. F. Brater. 1963. *Handbook of Hydraulics*, 5th ed. New York: McGraw-Hill. (Table 6-8.)

Fuente Mecánica de los Fluidos y Máquinas Hidráulicas, Claudio Mataix, 1982.

$$\zeta_{\text{exp } 400-50} = 0,05$$

$$\zeta_{\text{exp } 500-70} = 0,42$$

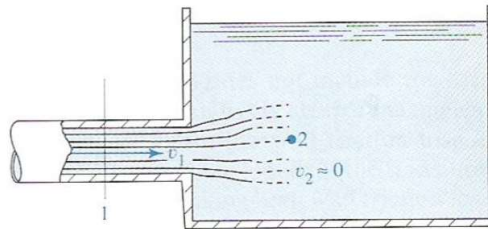
- Contracción Gradual:



Hydraulic Engineering, Haestad Methods

$$\zeta_{\text{cont } 670-500} = 0,12$$

- Expansión Brusca, $\zeta_{\text{exp brusca}}$:



Hydraulic Engineering, Haestad Methods

$$\zeta_{\text{exp brusca}} = 1$$

- Coeficiente de Pérdida Distribuidas y Metodologías en Cañerías:

Material	Coefficiente de Manning n	Coef. Hazen-Williams C _H	Coef. Rugosidad Absoluta e (mm)
Asbesto cemento	0.011	140	0.0015
Latón	0.011	135	0.0015
Tabique	0.015	100	0.6
Fierro fundido (nuevo)	0.012	130	0.26
Concreto (cimbra metálica)	0.011	140	0.18
Concreto (cimbra madera)	0.015	120	0.6
Concreto simple	0.013	135	0.36
Cobre	0.011	135	0.0015
Acero corrugado	0.022	--	45
Acero galvanizado	0.016	120	0.15
Acero (esmaltado)	0.010	148	0.0048
Acero (nuevo, sin recubrim.)	0.011	145	0.045
Acero (remachado)	0.019	110	0.9
Plomo	0.011	135	0.0015
Plástico (PVC)	0.009	150	0.0015
Madera (duelas)	0.012	120	0.18
Vidrio (laboratorio)	0.011	140	0.0015

(Fuente: Computer Applications in Hydraulic Engineering, 5th Edition, Haestad Methods)

Tabla 7 – Coeficiente de Rugosidad del Acero, Hydraulic Engineering, Haestad Methods

2.4 Envejecimiento de tuberías de hierro y acero



Figura 2.21. Envejecimiento en tuberías (Fox R. W. y McDonald A. T., 1992).

Con el transcurrir del tiempo y a consecuencia de diferentes causas, la capacidad de transporte del agua de las tuberías va disminuyendo. De acuerdo con las observaciones de Hazen y Williams la capacidad de un conducto se disminuye tal como se observa en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11 Capacidad de las tuberías de hierro y acero sin revestimiento interno permanente. (Azevedo N. J. y Acosta A. G., 1975)

Edad de la tubería	$D = 4"$ (100mm)	6" (150mm)	10" (250mm)	16" (400mm)	20" (500mm)	30" (750mm)
	Capacidad de la tubería Q (%)					
Tubos nuevos	100	100	100	100	100	100
Después de 10 años	81	83	85	86	86	87
Después de 20 años	68	72	74	75	76	77
Después de 30 años	58	62	65	67	68	69
Después de 40 años	50	55	58	61	62	63
Después de 50 años	43	49	54	56	57	59

Se han hecho distintos intentos para evaluar el efecto corrosivo del agua en conductos, basándose en la reducción del gasto calculado teóricamente de acuerdo con el pH del agua y el número de años de servicio de la tubería. El criterio de Genijew, expuesto por G. Sotelo A. (1982), parece ser el más efectivo para modificar la rugosidad absoluta del tubo nuevo, usando la siguiente ecuación:

$$e_t = e_0 + at$$

e_0 = rugosidad del tubo nuevo [mm]

e_t = rugosidad del tubo después de t años de servicio [mm]

a = coeficiente que depende del grupo en que se clasifique el agua que va a escurrir.

Tabla 2.12

t = número de años de servicio de la tubería

Tabla 8 – Coeficientes envejecimiento de Rugosidad del Acero, (Fox y McDonald)

Tabla 2.12. Coeficientes a de la fórmula de Genijew. Sotelo A., G. 1982.

Grupo	Tipo de agua	a
I	Agua con poco contenido mineral que no ocasiona corrosión. Agua con un pequeño contenido de materia orgánica y de solución de hierro.	$0.005 < a < 0.055$ Valor medio = 0.025
II	Agua con poco contenido mineral que origina corrosión. Agua que contiene menos de 3 mg/l de materia orgánica y hierro en solución.	$0.055 < a < 0.18$ Valor medio = 0.07
III	Agua que origina fuerte corrosión y con escaso contenido de cloruros y sulfatos (menos de 100 a 150 mg/l). Agua con un contenido de hierro de mas de 3 mg/l.	$0.18 < a < 0.40$ Valor medio = 0.20
IV	Agua que origina corrosión, con un gran contenido de cloruros y sulfatos (mas de 500 a 700 mg/l). Agua impura con una gran cantidad de materia orgánica.	$0.4 < a < 0.6$ Valor medio = 0.51
V	Agua con cantidades importantes de carbonatos, pero de dureza pequeña permanente, con residuo denso de 2000 mg/l.	a varía de 0.6 a mas que 1.

Tabla 9 – Coeficientes envejecimiento de Rugosidad del Acero, (Genijew, Sotelo 1982)

A.3. Desarrollo de la Curva de la Bomba CPN 400-400

Para el desarrollo de la curva de la bomba, a partir de la correspondiente al modelo CPH 500-640 ($\varnothing = 545\text{mm}$), se aplica el siguiente procedimiento:

Primero, identificamos el punto de mayor rendimiento ($\eta = 88.5\%$) y como centro en estos valores de Q-H tomaremos datos de H a intervalos de 100 lts/s .

Pto.	$Q \text{ [lts/s]}$	$H \text{ [m]}$
1	65	42,78
2	165	41,59
3	265	40
4	365	38,33
5	465	36,39
6	565	34,44
7	665	32,22
8	765	29,83
9	865	26,67
10	965	22,22

Tabla 10 – Datos H-Q Bomba CPH 500-640

Segundo, obtenemos un gráfico formado por rectas que unen esos puntos.

Tercero, confeccionamos un gráfico, conformado por segmentos (también de $Q = 100$) y con las pendientes del gráfico correspondiente a la bomba CPH 500-640. Pero las pendientes de los segmentos se aplicarán bajo el criterio que se presenta a continuación. De acuerdo al rendimiento, por ejemplo el punto 8 en la **Tabla 10 – Datos H-Q Bomba CPH 500-640**, se corresponde con el mayor rendimiento para la bomba CPH 500-640; la pendiente en este punto se utilizará para la bomba CPN 400-400 en el punto de mayor rendimiento $Q = 500 \text{ lts/s}$ y $H = 25 \text{ m}$, y luego utilizaremos las pendientes a derecha e izquierda para conformar la gráfica:

Pto	Q [lts/s]	H [m]
	0	34,6
1	65	33,5665
2	165	31,8965
3	265	29,9565
4	365	27,9665
5	465	25,7865
6	565	23,3965
7	665	20,4598
8	765	16,28
9	865	
10	965	

Tabla 11 – Valores H-Q para la bomba CPN 400-400

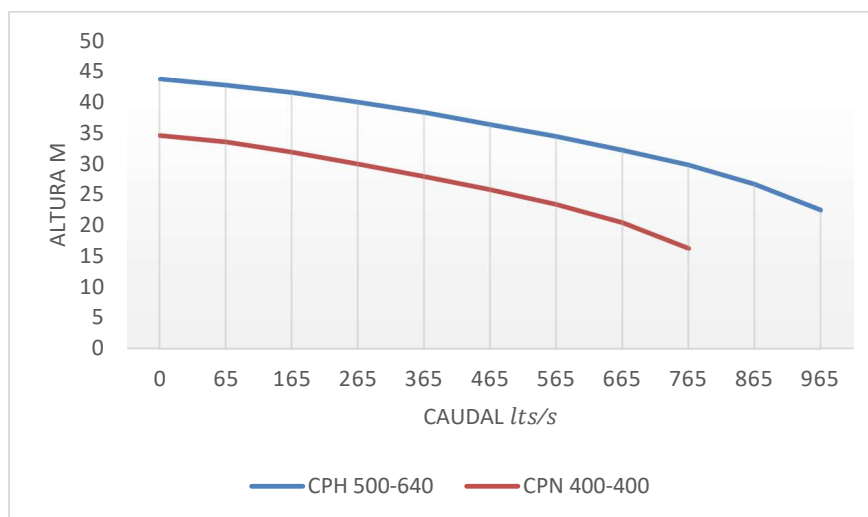


Imagen 44 - Curvas de Bombas CPH 500-650 y CPN 400-400

Finalmente, se construye un gráfico para tres bombas operando en paralelo (ver *Imagen 45 – Curvas de Bombas CPN 400-400 en paralelo*). El criterio utilizado fue que para una misma altura, la curva correspondiente a dos bombas tendrá como abscisa el doble de caudal y el sistema de tres bombas el triple.

Pto	1 Bomba Q [lts/s]	2 Bombas Q [lts/s]	3 Bombas Q [lts/s]	H [m]
	0	0	0	34,6
1	65	130	195	33,5665
2	165	330	495	31,8965
3	265	530	795	29,9565
4	365	730	1095	27,9665
5	465	930	1395	25,7865
6	565	1130	1695	23,3965
7	665	1330	1995	20,4598
8	765	1530	2295	16,28

Tabla 12 – Datos H-Q para Bombas CPN 400-400 en paralelo

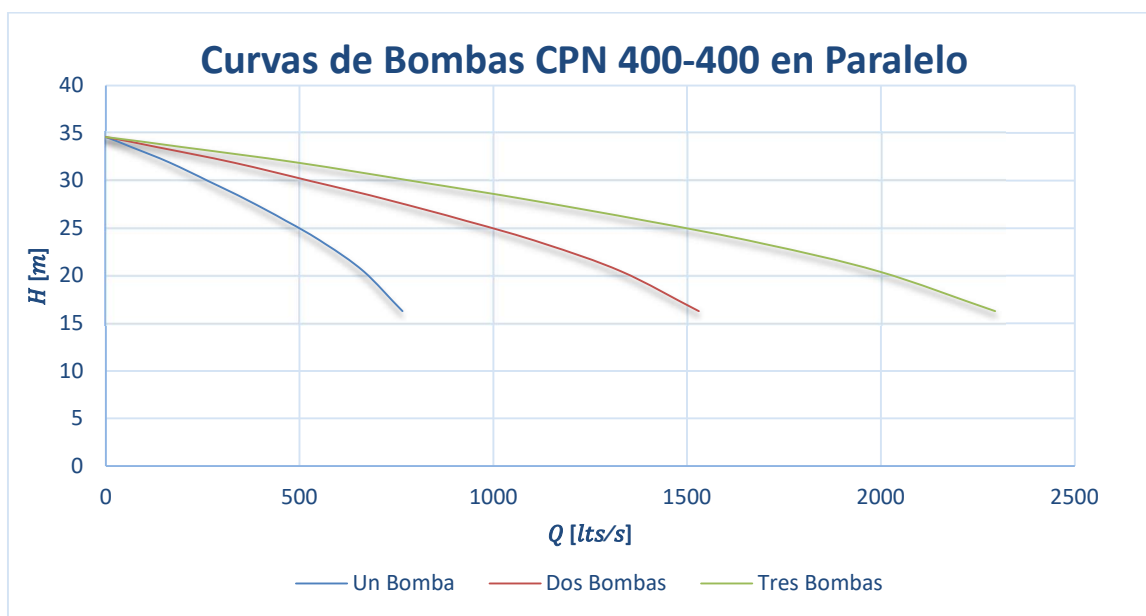


Imagen 45 - Curvas de Bombas CPN 400-400 en paralelo

A.4. Informe de Aforo realizado por EVARSA



AFOROS EN SISTEMA DE RIEGO PICÚN LEUFÚ

INFORME FINAL

Comitente: SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS DE NEUQUÉN

Mayo de 2017



**AFOROS SISTEMA DE RIEGO PICÚN LEUFÚ
SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS DE NEUQUÉN**

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	3
2.	OBJETIVO.....	3
3.	SÍNTESIS EJECUTIVA.....	3
4.	METODOLOGÍA.....	3
5.	RESULTADOS Y CONCLUSIONES	5
6.	ANEXO	5



AFOROS SISTEMA DE RIEGO PICÚN LEUFÚ SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS DE NEUQUÉN

1. INTRODUCCIÓN

A solicitud de la Dirección de Riego, perteneciente a la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la provincia de Neuquén, se presenta el siguiente informe técnico correspondiente a los aforos ejecutados en el Sistema de Riego de Picún Leufú.

2. OBJETIVO

El objeto del presente informe es presentar la metodología utilizada para realizar las mediciones, con el correspondiente informe resultante de las tareas de aforos líquidos realizados el día 27 de abril de 2017.

3. SÍNTESIS EJECUTIVA

Las mediciones de profundidad en las secciones se realizaron a partir de la obtención de datos de velocidad y profundidad con un Perfilador Acústico de Corriente por Efecto Doppler (ADCP) y con un Velocímetro por Efecto Doppler (ADV) en 9 situaciones de funcionamiento de bombas seleccionadas por la Inspección durante el desarrollo de las tareas:

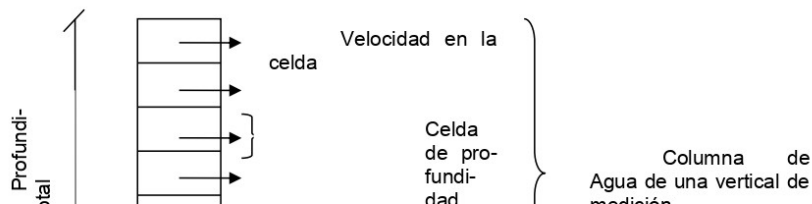
1. Previo al ingreso del Sistema de Riego.
2. Las 3 bombas del Sistema en funcionamiento.
3. Bombas Nº 1 y Nº 2 en funcionamiento.
4. Bombas Nº 2 y Nº 3 en funcionamiento.
5. Bombas Nº 1 y Nº 3 en funcionamiento.
6. Bombas Nº 3.
7. Comparto Margen Derecha.
8. Comparto Margen Izquierda.

4. METODOLOGÍA

Se realizaron aforos líquidos en las secciones determinadas por el comitente. Para la primera sección se realizaron siete aforos líquidos con el ADCP a modo de réplica para minimizar el error de muestreo del instrumento y poder obtener un caudal promedio si el comitente así lo deseara. En la segunda sección, siguiendo el mismo procedimiento, se realizaron cinco mediciones de caudal. A continuación se detalla el procedimiento de medición de caudales líquidos realizado mediante el ADCP.

El ADCP en cada vertical de medición divide la columna de agua, en segmentos uniformes apilados llamados "celdas de profundidad". En cada celda obtiene el valor de la velocidad del agua y el caudal que atraviesa la celda.

En las mediciones se adoptará una altura de celda de entre 0.25 – 1.00 m, a requerimiento del Cliente. El ancho de la celda depende de la distancia que recorre la embarcación en el tiempo transcurrido entre la medición de dos verticales de medición consecutivas.





AFOROS SISTEMA DE RIEGO PICÚN LEUFÚ SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS DE NEUQUÉN

Las componentes de la velocidad son con dirección Este-Oeste y signo positivo hacia el Este, llamada Velocidad Este y con dirección Norte-Sur, con signo positivo hacia el Norte, llamada Velocidad Norte. De la composición de estas dos se obtiene el módulo y dirección de la velocidad.

El caudal total de cada vertical es la sumatoria de los caudales que atraviesan cada celda de toda la columna de agua.

5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los resultados se presentan en la siguiente tabla donde se detallan:

- Aforo
- Fecha
- Hora Inicio
- Sección aforada
- Caudal
- Método de Medición

Sintéticamente, los resultados de las tareas de aforo en las dos condiciones requeridas por el comitente fueron:

5.1. Canal Antes de las Bombas

Sección Transversal	Fecha de inicio	Hora de inicio	Ancho (m)	Area (m ²)	Velocidad promedio (m/s)	Q Total (m ³ /s)
1	27/04/2017	11:32:49	5,099	3,989	0,589	2,350
2	27/04/2017	11:34:06	4,740	3,929	0,592	2,325
3	27/04/2017	11:35:10	5,210	4,360	0,567	2,471



**AFOROS SISTEMA DE RIEGO PICÚN LEUFÚ
SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS DE NEUQUÉN**

4	27/04/2017	11:36:13	5,539	4,444	0,555	2,467
5	27/04/2017	11:37:14	5,224	4,016	0,564	2,265
6	27/04/2017	11:38:17	5,459	4,428	0,541	2,395
		Promedio	5,212	4,194	0,568	2,379

5.2. Bombas N° 1, 2 y 3 en funcionamiento

Sección Transversal	Fecha de inicio	Hora de inicio	Ancho (m)	Area (m2)	Velocidad promedio (m/s)	Q Total (m3/s)
1	27/04/2017	14:15:00	6.85	2.613	0.432	1.128

5.3. Bombas N° 1 y N° 2 en Funcionamiento.

Sección Transversal	Fecha de inicio	Hora de inicio	Ancho (m)	Area (m2)	Velocidad promedio (m/s)	Q Total (m3/s)
1	27/04/2017	12:29:00	6.3	1.84	0.466	0.858

5.4. Bombas N° 2 y N° 3 en Funcionamiento.

Sección Transversal	Fecha de inicio	Hora de inicio	Ancho (m)	Area (m2)	Velocidad promedio (m/s)	Q Total (m3/s)
1	27/04/2017	13:19:00	6.3	2.015	0.414	0.836

5.5. Bombas N° 1 y N° 3 en Funcionamiento.

Sección Transversal	Fecha de inicio	Hora de inicio	Ancho (m)	Area (m2)	Velocidad promedio (m/s)	Q Total (m3/s)
1	27/04/2017	11:01:00	6.7	2.101	0.409	0.861

5.6. Bombas N° 3 en Funcionamiento.

Sección Transversal	Fecha de inicio	Hora de inicio	Ancho (m)	Area (m2)	Velocidad promedio (m/s)	Q Total (m3/s)
1	27/04/2017	15:01:00	5.8	1.42	0.302	0.432



**AFOROS SISTEMA DE RIEGO PICÚN LEUFÚ
SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS DE NEUQUÉN**

5.7. Comparto Margen Izquierda.

Sección Transversal	Fecha de inicio	Hora de inicio	Ancho (m)	Area (m2)	Velocidad promedio (m/s)	Q Total (m3/s)
1	27/04/2017	10:10:00	1.8	1.33	0.263	0.35

5.8. Comparto Margen Derecha.

Sección Transversal	Fecha de inicio	Hora de inicio	Ancho (m)	Area (m2)	Velocidad promedio (m/s)	Q Total (m3/s)
1	27/04/2017	09:55:00	0.9	0.51	0.567	0.298

Ing. Nicolás Secco
EVARSA

A.5. Desarrollo de Curvas del Sistema

A.5.1. Curva de Sistema para la Bomba III en funcionamiento

Curva de Sistema con la Bomba N°3 en funcionamiento:

$$H_N^{BIII} = \left(\alpha_2 \frac{\bar{c}_2^2}{2g} \right) + H_B + \sum H_{rs}^i + \sum H_{rp}^i$$

El sistema se constituye de la siguiente manera: ensanchamiento al ingreso ($\zeta_{670-500}$), curva a 90° diámetro 500mm ($\zeta_{Codo\ 90}$), curva a 90° diámetro 500mm ($\zeta_{Codo\ 90}$), válvula mariposa tipo wafer 500mm ($\zeta_{V.Marip}$), expansión gradual 400-500 ($\zeta_{400-500}$), válvula mariposa tipo wafer 500mm ($\zeta_{V.Marip}$), válvula Antirretorno tipo disco partido 500mm, curva a 45° diámetro 500mm ($\zeta_{Curva\ 45}$), cambio de dirección ($\zeta_{C.D.}$), curva a 45° diámetro 700mm ($\zeta_{Curva\ 45}$) y descarga a canal a cielo abierto desde tubería diámetro 700mm ($\zeta_{exp\ brusca}$).

Las pérdidas localizadas vienen dadas por:

$$\begin{aligned} \sum H_{rs}^i &= (0,12 + 0,10 + 0,10 + 0,20 + 0,05 + 0,20 + 0,50) * \left(\frac{Q}{\pi * (0,25\ m)^2} \right)^2 \frac{1}{2g} \\ &+ 12,96 * \frac{1}{m^4} * \frac{Q^2}{2g} + 1,14 * \left(\frac{Q}{\pi * (0,35\ m)^2} \right)^2 \frac{1}{2g} \end{aligned}$$

$$\sum H_{rs}^i = \frac{1}{2g} * (36,5729 + 12,96 + 7,6972) * \frac{1}{m^4} * Q^2 = 2,9169 \frac{s^2}{m^5} Q^2$$

Las pérdidas distribuidas vienen dadas por:

$$\sum H_{rp}^i = H_{rp}^{\phi 500} + H_{rp}^{\phi 700}$$

Suponiendo en primera instancia un caudal de $0,5\ m^3/s$, los números de Reynolds para los diámetros $\phi = 0,5\ m$ y $\phi = 0,7\ m$ son:

$$Re = \frac{c * \phi * \rho}{\eta} = \frac{c * \phi}{v} = \frac{4 * Q * \phi}{\pi * \phi^2 * v} = \frac{4 * Q}{\pi * \phi * v} \quad (19)$$

v : Viscosidad Cinemática del agua [m^2/s] **A.1. Propiedades de Fluidos;**

η : Viscosidad Dinámica del agua $[kg/m * s]$;

ρ : Densidad del agua $[kg/m^3]$;

c : Velocidad Local $[m/s]$;

$$Re^{\phi 500} = 1,26 \cdot 10^6 \quad \text{y} \quad Re^{\phi 700} = 0,903 \cdot 10^6$$

Además, sabemos que la rugosidad del acero nuevo (**Tabla 7**) es $\varepsilon_0 = 0.045mm$. De acuerdo al criterio de Genijew, una tubería expuesta dependiendo del entorno, experimenta un aumento en su rugosidad conforme al paso del tiempo, y este deterioro es más o menos severo depende del entorno,

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + a * t$$

La **Tabla 8** presenta los valores de a de acuerdo al entorno. Dado que el sistema posee un alto contenido de partículas abrasivas en su flujo, seleccionaremos $a = 0,025$, y dado que “La Picacita” tiene 26 años de operación, la rugosidad $\varepsilon = 0.695 mm$. Si ingresamos al diagrama de Moody con la rugosidad y el número de Reynolds, obtenemos los factores de pérdidas de por fricción en la cañería:

$$\lambda_{\phi 500} = 0.025 \quad \text{y} \quad \lambda_{\phi 7} = 0.023$$

Por el relevamiento sabemos que:

$$L_{\phi 500} = 15,5 m \quad \text{y} \quad L_{\phi 700} = 152 m$$

Las pérdidas distribuidas en función del caudal son:

$$H_{rp}^{\phi 500} = \lambda_{\phi 500} \frac{L c^2}{\phi 2g} = \lambda_{\phi 500} \frac{L_{\phi 500} * 8}{\pi^2 * (0,5m)^5} \frac{Q^2}{g} = 1.0246 * \frac{s^2}{m^5} * Q^2$$

$$H_{rp}^{\phi 700} = \lambda_{\phi 700} \frac{L c^2}{\phi 2g} = \lambda_{\phi 700} \frac{L_{\phi 800} * 8}{\pi^2 * (0,7m)^5} \frac{Q^2}{g} = 1.7187 * \frac{s^2}{m^5} * Q^2$$

Entonces:

$$\sum H_{rp}^i = 2.7433 * \frac{s^2}{m^5} * Q^2$$

Por último, se observa que la velocidad media en el punto 2 es $\bar{c}_2 = 0,320 \text{ m/s}$, de acuerdo con el aforo realizado por EVARSA (**A.4. Informe de Aforo de EVARSA**).

La curva del sistema cuando se encuentra funcionando la bomba N°3 solamente es:

$$H_N^{BIII} = \left[\frac{(0,320 \text{ m/s})^2}{2g} \right] + 23.5456 \text{ m} + 2.9169 \frac{\text{s}^2}{\text{m}^5} Q^2 + 2.7433 * \frac{\text{s}^2}{\text{m}^5} * Q^2$$

$$H_N^{BIII} = 23.551 \text{ m} + 5.6602 * \frac{\text{s}^2}{\text{m}^5} * Q^2$$

A.5.2. Curva del Sistema para la Todas las Bombas en funcionamiento

Se realizará la curva del sistema para las tres bombas en funcionamiento, en este caso no se presentará el procedimiento, ya que es el análogo al utilizado para la Bomba III. Como hipótesis adicional se dirá que cada bomba aporta 1/3 del caudal total, y cada accesorio será ponderado por el caudal que lo atraviesa.

El sistema se constituye de la siguiente manera:

Curva de Bomba III:

Ensanchamiento al ingreso ($\zeta_{670-500}$), curva a 90° diámetro 500mm ($\zeta_{Codo 90}$), curva a 90° diámetro 500mm ($\zeta_{Codo 90}$), válvula mariposa tipo wafer 500mm ($\zeta_{V.Marip}$), expansión gradual 400-500 ($\zeta_{400-500}$), válvula mariposa tipo wafer 500mm ($\zeta_{V.Marip}$), válvula Antirretorno tipo disco partido 500mm, curva a 45° diámetro 500mm ($\zeta_{Curva 45}$), cambio de dirección ($\zeta_{C.D}$)

Las pérdidas localizadas vienen dadas por:

$$\sum H_{rs}^i = (0,12 + 0,10 + 0,10 + 0,20 + 0,05 + 0,20 + 0,14) * \left(\frac{Q}{\pi * 3 * (0.25 \text{ m})^2} \right)^2 \frac{1}{2g} + 12.96 * \frac{1}{\text{m}^4} * \frac{Q^2}{9 * 2g}$$

$$H_{rs}^{BIII} = \frac{1}{2g} * (2.6226 + 1.44) * \frac{1}{\text{m}^4} * Q^2 = 0.22322 \frac{\text{s}^2}{\text{m}^5} Q^2$$

Curva de Bomba II:

Ensanchamiento al ingreso ($\zeta_{670-500}$), curva a 90° diámetro 500mm ($\zeta_{Codo 90}$), válvula mariposa tipo wafer 500mm ($\zeta_{V.Marip}$), expansión gradual 400-500 ($\zeta_{400-500}$), válvula

mariposa tipo wafer 500mm ($\zeta_{V.Marip.}$), válvula Antirretorno tipo Disco Oscilante curva a 45° diámetro 500mm ($\zeta_{Curva 45.}$), cambio de dirección ($\zeta_{C.D.}$)

Las pérdidas localizadas vienen dadas por:

$$\sum H_{rs}^i = (0,12 + 0,10 + 0,20 + 0,05 + 0,20 + 0,14) * \left(\frac{Q}{\pi * 3 * (0,25 \text{ m})^2} \right)^2 \frac{1}{2g} + 25,96$$

$$* \frac{1}{m^4} * \frac{Q^2}{9 * 2g} - 3,6 * \frac{1}{m * s} * \frac{Q}{9 * g} + 1,2 * \frac{m^2}{s^2} * \frac{1}{g}$$

$$H_{rs}^{BII} = \frac{1}{2g} * (1,3751 + 1,4422) * \frac{1}{m^4} * Q^2 - 0,04077 \frac{s}{m^2} Q + 0,1223 \text{ m}$$

$$H_{rs}^{BII} = 0,1436 * \frac{s^2}{m^5} * Q^2 - 0,04077 \frac{s}{m^2} Q + 0,1223 \text{ m}$$

Curva de Bomba I:

Ensanchamiento al ingreso ($\zeta_{670-500.}$), curva a 90° diámetro 500mm ($\zeta_{Codo 90.}$), curva a 90° diámetro 500mm ($\zeta_{Codo 90.}$), válvula mariposa tipo wafer 500mm ($\zeta_{V.Marip.}$), expansión gradual 400-500 ($\zeta_{400-500.}$), válvula mariposa tipo wafer 500mm ($\zeta_{V.Marip.}$), válvula Antirretorno tipo Disco Oscilante 500mm, expansión gradual 500-700 ($\zeta_{500-700.}$), cambio de dirección ($\zeta_{C.D.}$)

Las pérdidas localizadas vienen dadas por:

$$\sum H_{rs}^i = (0,12 + 0,10 + 0,10 + 0,20 + 0,05 + 0,20 + 0,42) * \left(\frac{Q}{\pi * 3 * (0,25 \text{ m})^2} \right)^2 \frac{1}{2g}$$

$$+ 25,96 * \frac{1}{m^4} * \frac{Q^2}{9 * 2g} - 3,6 * \frac{1}{m * s} * \frac{Q}{9 * g} + 1,2 * \frac{m^2}{s^2} * \frac{1}{g}$$

$$H_{rs}^{BI} = \frac{1}{2g} * (3,4296 + 1,4422) * \frac{1}{m^4} * Q^2 - 0,04077 \frac{s}{m^2} Q + 0,1223 \text{ m}$$

$$H_{rs}^{BI} = 0,2483 * \frac{s^2}{m^5} * Q^2 - 0,04077 \frac{s}{m^2} Q + 0,1223 \text{ m}$$

Confluencia entre BI y BII

$$\frac{Q_1}{Q_1+Q_2} = 0,5 \quad , \quad \frac{Q_2}{Q_1+Q_2} = 0,5 \quad \text{y} \quad \alpha = 45^\circ$$

$$H_{rl} = 0,25 * \frac{c^2}{2g} \quad \text{y} \quad H_{rr} = 0,2 * \frac{c^2}{2g}$$

$$c = \frac{2}{3} \frac{4 * Q}{[\pi * (0,7m)^2]}$$

$$H_{rl} + H_{rr} = 0.06883 * \frac{s^2}{m^5} * Q^2$$

Confluencia entre BI/BII y BIII:

$$\frac{Q_3}{Q_1+Q_2+Q_3} = 0,33 \quad , \quad \frac{Q_1+Q_2}{Q_1+Q_2+Q_3} = 0,67 \quad \text{y} \quad \alpha = 45^\circ$$

$$H_{rl} = 0 * \frac{c^2}{2g} \quad \text{y} \quad H_{rr} = 0.3 * \frac{c^2}{2g}$$

$$c = \frac{4 * Q}{[\pi * (0,7m)^2]}$$

$$H_{rl} + H_{rr} = 0.1032 * \frac{s^2}{m^5} * Q^2$$

Faltan las curvas de 45° y la descarga al canal secundario:

$$H_{rs}^{700} = (0,14 + 1) * \left(\frac{Q}{\pi * (0,35 m)^2} \right)^2 \frac{1}{2g} = 0.3923 * \frac{s^2}{m^5} * Q^2$$

$$\sum H_{rs}^i = 1.1795 \frac{s^2}{m^5} * Q^2 - 0.0954 \frac{s}{m^2} Q + 0.2446 m$$

Las distribuidas:

$$H_{rp}^{\phi 500} = \lambda_{\phi 500} \frac{L c^2}{\phi 2g} = 0.025 \frac{29,5m * 8}{\pi^2 * 9 * (0,5m)^5} \frac{Q^2}{g} = 0,2167 * \frac{s^2}{m^5} * Q^2$$

$$H_{rp}^{\phi 700} = \lambda_{\phi 700} \frac{L c^2}{\phi 2g} = 0.023 \frac{152 * 8}{\pi^2 * (0,7m)^5} \frac{Q^2}{g} = 1,7187 * \frac{s^2}{m^5} * Q^2$$

$$\sum H_{rp}^i = 1.9354 * \frac{s^2}{m^5} * Q^2$$

$$H_N^{BI+BII+BIII} = 23.551 m + 3.1149 * \frac{s^2}{m^5} * Q^2 - 0.0954 \frac{s}{m^2} Q + 0.2446 m$$

$$H_N^{BI+BII+BIII} = 23.7956 m + 3.1149 * \frac{s^2}{m^5} * Q^2 - 0.0954 \frac{s}{m^2} Q$$

REFERENCIAS

- [1] Johann Friedrich Gülich (2020), “*Centrifugal Pumps* (Fourth Edition)”;
- [2] Claudio Mataix (1974), “*Turbomáquinas Hidráulicas*”;
- [3] Christopher Earls Brennen (1995), “*Cavitation and Bubble Dynamics*”;
- [4] F.A.E Breugelmans y M. Sens, “Prerotation and Fluid Recirculation in the Suction Pipe of Centrifugal Pumps”;
- [5] Mitsukiyo Murakama y Noamich Heya (1966), “Swirling Flow in Suction pipe of Centrifugal Pumps”;
- [6] F. Ferrini (1974), “*Some aspects of self-induced prerotation in the suction pipe of centrifugal pumps*”;
- [7] B. Schiavello (1975), “*Optimization of pump design based on a parametric study*”;
- [8] M. Sen (1976), “*Experimental study on the inlet flow field of a centrifugal pump*”.
- [9] J. Chang (2010), “*Cavitation and cavitation erosion of pump and turbine with silt-laden water as working médium*”;
- [10] Jie Sun, Xinfeng Ge, Ye Zhou, Demin Liu, Juan Liu, Gaiye Li, Yuan Zheng (2023) “*Research on synergistic erosion by cavitation and sediment: A review*”;
- [11] ANSI/HI 9.6.1. (2012), “*Rotodynamics Pumps, Guideline to NPSH Margin*”;
- [12] <https://select.wilo.com/Region.aspx?ReturnUrl=%2fStartMain.aspx;>
- [13] <https://product-selection.grundfos.com/>
- [14] K. Wark (6ed), “*Termodinámica*”;
- [15] Apuntes de la Cátedra Máquinas Motrices, Universidad Nacional del Comahue;
- [16] [https://www.bombasideal.com/;](https://www.bombasideal.com/)