

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica

**DETERMINAR LA CAUSA RAÍZ DE VIBRACIÓN
EXCESIVA PRESENTE EN UNA BOMBA
BARREN VERTICAL INSTALADA EN LA
U.M. PUCAMARCA–MINSUR PARA
AMPLIAR LA CAPACIDAD
OPERATIVA**

TESIS

Presentada por:

Bach. Abel Jhonatan Quirita Yana

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO MECÁNICO

TACNA – PERÚ

2022

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica

**DETERMINAR LA CAUSA RAIZ DE VIBRACIÓN
EXCESIVA PRESENTE EN UNA BOMBA BARREN
VERTICAL INSTALADA EN LA U.M. PUCAMARCA –
MINSUR PARA AMPLIAR LA CAPACIDAD
OPERATIVA**

Tesis sustentada el 29 de diciembre del 2021, estando integrado el jurado calificador por:

PRESIDENTE



.....
Dr. Jesús Placido Medina Salas

SECRETARIO



.....
Dr. Avelino Godofredo Pari Pinto

VOCAL



.....
Ing. Daniel Cárdenas García

ASESOR



.....
Ing. Julio Rey Queque Vildoso

AGRADECIMIENTO

Porque la vida es un regalo que solo Dios da.

Me faltaría vida para retribuir el esfuerzo y cariño de mis padres para guiarme.

El único soporte sincero y desinteresado, solo te lo brindan tus hermanos, siempre contaré con ellos.

Solo tendré una persona caminando de mi lado, mi compañera de vida. Gracias por todo.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

INTRODUCCIÓN.....1

CAPÍTULO I:PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA3

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....3

1.1.1. **Antecedentes del problema**3

1.1.2. **El problema**5

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA6

1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA7

1.3.1. **Justificación social**.....8

1.3.2. **Justificación económica**8

1.3.3. **Justificación ambiental**8

1.4. ALCANCES Y LIMITACIONES9

1.5. OBJETIVOS.....9

1.5.1. **Objetivo general**.....9

1.5.2. **Objetivos específicos**10

1.6. HIPÓTESIS.....10

1.6.1. **Hipótesis específicas**10

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....11

2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO11

2.1.1. **Antecedente 1**11

2.1.2. **Antecedente 2**12

2.1.3. **Antecedente 3**12

2.1.4. **Antecedente 4**13

2.2. BASES TEÓRICAS.....14

2.2.1. Proceso extracción de oro y plata de la UM	
Pucamarca.....	14
2.2.2. Bombas	19
2.2.3. Vibración	28
2.2.3.1. Movimiento armónico sencillo	28
2.2.3.2. Ecuaciones de movimiento	30
2.2.3.3. La medición de amplitud de vibración.....	31
2.2.2.4. Definición de fase	33
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	37
3.1. POBLACIÓN Y MUESTRA	37
3.2. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA RECOLECCIÓN DE DATOS	38
3.2.1. Materiales e instrumentos.....	38
3.2.2. Técnica	38
3.3. EL PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS	40
CAPÍTULO IV: DESCRIPCIÓN Y DIAGNÓSTICO	41
4.1. MONTAJE E INSTALACIÓN DE LÍNEA Y BOMBA BARREN .41	
4.1.1. Montaje de la placa base	41
4.1.2. Montaje del conjunto de la bomba	42
4.1.3. Montaje de la caja de rodaje y motor.....	42
4.1.4. Puesta en marcha y análisis de pruebas	46
4.2. DIAGNÓSTICO	50
CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	57
5.1. RESULTADOS.....	57
5.1.1. Verificar la implementación; montaje e instalación de una bomba Barren vertical	57
5.1.2. Determinación de la causa raíz de la vibración excesiva de la bomba Barren vertical	57

5.1.3. Establecer la ampliación de la capacidad operativa de la UM Pucamarca	59
5.2. DISCUSIONES	60
CONCLUSIONES.....	61
RECOMENDACIONES.....	62
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Datos de las pruebas de vibración.....	46
Tabla 2 Datos de las pruebas de vibración en el motor eléctrico	49
Tabla 3 Datos de la prueba de vibración con el soporte de motor girado a 90°	53
Tabla 4 Toma de valores de vibración del motor eléctrico montado en la bomba a la velocidad de operación de 1780 RPM, con rotación del soporte motor a 90°	55
Tabla 5 Toma de valores de vibración del motor eléctrico con el VFD a 1680 RPM.....	55
Tabla 6 Toma de valores de vibración del motor eléctrico con el VFD a 1600 RPM.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de chancado	15
Figura 2. Proceso de lixiviación.....	17
Figura 3. Proceso de refinería.....	18
Figura 4. Barreno	20
Figura 5. Clasificación de bombas	25
Figura 6. Bomba vertical	27
Figura 7. Movimiento armónico sencillo.	29
Figura 8. Amplitud RPC	32
Figura 9. Definición de fase	33
Figura 10. Ubicación de los puntos de prueba	34
Figura 11. Puntos de mediciones triaxiales.....	35
Figura 12. Orientación de sensores para una máquina original.....	36
Figura 13. Orientación de sensores para una máquina vertical.....	36
Figura 14. Medición de las tolerancias de la placa base.	41
Figura 15. Montaje del soporte del motor eléctrico.....	42
Figura 16. Verificación de alineamiento bomba.....	43
Figura 17. Regulación del levante del eje.	43
Figura 18. Sello mecánico instalado.....	44
Figura 19. Montaje de motor y bomba.....	45
Figura 20. Zonas de Impacto	47

Figura 21.	Resultado prueba de impacto a la descarga, brida de motor.	48
Figura 22.	Perpendicular a la descarga, brida de motor, brida de motor	48
Figura 23.	ODS Natural frequency 30.25 Hz.	50
Figura 24.	Rotación del soporte motor.	52
Figura 25.	Resultado prueba de impacto paralelo a la descarga, brida motor, soporte motor @ 90°.....	53
Figura 26.	Perpendicular a la descarga, brida de motor, brida de motor, soporte motor @ 90°.....	54
Figura 27.	Zonas de pruebas de impacto con soporte rotado a 90°	54
Figura 28.	Reemplazo de la nueva pieza soporte-motor.	59

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Sistema de bombeo solución pobre (Barren) concreto-bomba vertical / planta y sección	67
Anexo 2: Sistema de bombeo solución pobre (Barren) concreto-bomba vertical / secciones y detalles	68
Anexo 3: Sistema de bombeo solución pobre (Barren), disposición general de lineaz zona tanque Barren.....	69
Anexo 4: General Arrangement Drawing	70
Anexo 5: Vistas del nuevo soporte - motor.....	71

RESUMEN

El objetivo de la presente tesis es determinar los componentes y condiciones que producen una vibración excesiva durante las pruebas de arranque de una bomba vertical, Flowserve Vpc/2Dekh-8, de una capacidad de servicio requerida de 1 065 m³/h y accionada por un motor eléctrico, Teco Westinghouse Aehe-Ec, con una potencia de 1 306 kW. Estas pruebas se realizaron en la UM Pucamarca – Minsur. Para las pruebas de arranque se realizó un análisis de vibraciones, el mismo que arrojó una desviación excesiva del límite permisible entre la frecuencia fundamental del motor (29,66 Hz) con la frecuencia del conjunto (30,25 Hz); por lo tanto, no se ha podido operar el equipo de bombeo con carga por tener elevados y no permisibles valores de vibración de acuerdo con la normatividad ISO 9001:2008 y ANSI/NCSL Z540-1.

Después de varias pruebas en vacío del conjunto motor y acoplamiento se determina que la vibración se produce principalmente por el peso que tiene que tolerar el soporte (condición que no fue tomada en consideración para el diseño) y la frecuencia fundamental del motor se debe reducir a 1 600 RPM para reducir resonancia mecánica con el conjunto motor-acoplamiento-bomba, logrando un funcionamiento continuo y seguro.

Palabras clave: Resonancia Mecánica, Vibración, Bomba Vertical.

ABSTRACT

The objective of this thesis is to determine the components and conditions that produce excessive vibration during start-up tests of a vertical pump, Flowserve Vpc/2Dekh-8, with a required service capacity of 1 065 m³/h and driven by an electric motor, Teco Westinghouse Aehec-Ec, with a power of 1 306 kW. These tests were carried out at UM Pucamarca - Minsur. For the start-up tests, a vibration analysis was performed, which showed an excessive deviation from the permissible limit between the fundamental frequency of the motor (29.66 Hz) and the frequency of the set (30.25 Hz); therefore, the pumping equipment could not be operated under load due to high and impermissible vibration values in accordance with ISO 9001:2008 and ANSI/NCSL Z540-1 standards.

After several no-load tests of the motor and coupling assembly, it was determined that the vibration is produced mainly by the weight that the support has to tolerate (a condition that was not taken into consideration for the design) and the fundamental frequency of the motor should be reduced to 1 600 RPM to reduce mechanical resonance with the motor-coupling-pump assembly, achieving a continuous and safe operation.

Keywords: Mechanical Resonance, Vibration, Vertical Pumps.

INTRODUCCIÓN

La empresa MINSUR del grupo empresarial Breca y con más de 42 años dedicada al rubro de la minería peruana, opera en tres unidades mineras principales: San Rafael ubicada en Melgar, región de Puno; Fundición Pisco, en Ica y Pucamarca que opera en Palca región de Tacna.

En la Unidad Minera de Pucamarca, se centra el presente estudio. Minsur planificó ampliar la capacidad operativa de dicha unidad, lo que precisó una serie de cambios, mejoras e implementaciones en todo el proceso.

La lixiviación es parte fundamental de la extracción de oro y plata que se realiza en Pucamarca y es aquí donde se requería la instalación de una 3ra. bomba de turbina vertical de exactamente 1750 HP.

La instalación de la bomba Barren marchaba de acuerdo con lo establecido según las guías, según los manuales, según el cronograma, sin embargo, al hacer las pruebas que dictaban las normas para la puesta en marcha, los valores obtenidos indicaban un exceso de vibración

Fue así como surgió la interrogante del presente trabajo ¿Cómo determinar la causa raíz de vibración excesiva presente en una bomba

Barren vertical instalada en la UM Pucamarca – Minsur para ampliar la capacidad operativa?

Para llevar a cabo el siguiente estudio se ha estructurado 5 capítulos. En el capítulo I se enfoca el problema, la justificación, el objetivo e hipótesis del tema. En el capítulo II se detalla el marco teórico, con precisiones teórico-conceptuales de las bombas, proceso de lixiviación y la vibración, con conceptos que permitirán comprender este fenómeno.

En el capítulo III marco metodológico se aborda el tipo, diseño, técnicas e instrumentos para el desarrollo del presente trabajo. En el capítulo IV titulado descripción y diagnóstico se describe el proceso de instalación y montaje de la bomba hasta el hallazgo del problema y las posibles soluciones.

Finalmente, en el capítulo V sobre resultados y discusiones se puntualiza el resultado y solución del problema, así como la concordancia en los fundamentos en la teoría del análisis de vibración.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

1.1.1. Antecedentes del problema

Para la ampliación de capacidad a 24 000 tpd se proyectó la instalación de una tercera bomba de turbina vertical de 1750 HP y una nueva línea de 16" de diámetro. La nueva bomba deberá estar instalada al costado de las dos bombas existentes de solución Barren de 1 250 HP. Esta nueva bomba trabajará con la bomba existente que tiene un variador de frecuencia, y la bomba que tiene arranque *soft start* quedará como stand by, la línea nueva de 16" trabajará con la bomba de 1 750 HP y la línea existente de 14" de diámetro trabajará con la bomba existente de 1 250 HP.

El proyecto consideró las modificaciones al sistema eléctrico existente para la incorporación de una tercera bomba de impulsión de solución Barren, asegurando la operación simultánea de dos de estas dos bombas.

La investigación perfiló además la instalación de dos (02) nuevos grupos electrógenos de iguales características a los existentes, para atender los nuevos requerimientos de energía del proyecto en operación de emergencia (durante un corte del suministro eléctrico de la red nacional), en que se deberán respaldar dos (02) bombas de solución barren operando simultáneamente y las cargas alimentadas a través de transformadores 40-TRP-09 y 40-TRA-02.

Se consideró también el reemplazo del transformador existente 40-TRP-02 de 2,5 MVA por uno de mayor capacidad (05 MVA), debido al aumento de carga generado por la incorporación de la nueva bomba de impulsión de solución barren 30-PP-07C (con motor de 1 750 HP) y la necesidad de operar simultáneamente dos (02) de estas bombas.

La nueva línea de impulsión de Ø16", será colocada dentro del actual canal abierto existente (según lo planteado por Minsur), siendo el canal abierto y sus puntos de descarga de emergencia, los puntos empleados para la derivación de las aguas de contacto en caso de emergencias y derivaciones a las pozas que cumplen dicho fin.

1.1.2. El problema

Inicialmente, se tuvo que definir las posibles causas de exceso de vibración que se presenta en bombas centrifugas:

- Desbalanceo
- Desalineación
- Problemas en los rodamientos
- Fugas
- Problemas estructurales
- Problemas fluido-dinámicos (Trocel, 2019)

Además, previamente se establecieron las consecuencias que ocurrieron a nivel internacional como fundamento de nuestro estudio, para evitar posibles daños. Se toma como antecedente la comunidad de Requinoa en la zona central de Chile, donde a mediados del mes de julio del año 2012, la minera Valle Central, se disponía a poner en marcha un tercer espesador en la planta procesadora de relaves, que iniciaba la operación de una nueva sala de bombas de recuperación de agua industrial y es durante la puesta en marcha de esta última en la que se detectan 3 fallas particulares; dos de ellas eran roturas de machones de acoplamiento y la otra una fractura de eje; las 3 tenían algo en común, los altos niveles

de vibración en el *piping* de descarga de las bombas y en el pasillo superior de la sala (Albayay, 2015).

En la UM Pucamarca – Minsur S.A. se proyectó implementar una nueva bomba Barren adicional a las dos existentes, durante el proceso de instalación, montaje y puesta en marcha se tuvieron resultados de excesiva vibración mecánica.

Los resultados excesivos de vibración mecánica de la bomba Barren dificultan la operatividad del equipo ya que no se encuentra dentro de los límites máximos permisibles, lo que podría causar daños irreversibles en el equipo.

Se realizó la medición de vibración y se tomaron más puntos de referencia hasta encontrar el mecanismo y/o parte defectuosa que podría estar ocasionando la vibración excesiva.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Ante la formulación de esta interrogante se tiene:

¿Cómo determinar la causa raíz de vibración excesiva presente en una bomba Barren vertical instalada en la UM Pucamarca – Minsur para ampliar la capacidad operativa?

1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

En el último siglo la evolución de la tecnología ha sido muy notoria, dando la impresión de que en la actualidad todo lo que pasa en la imaginación del hombre puede existir y que no hay límite que lo detenga, y hasta cierto punto esto puede ser cierto. Sin embargo, existen los preceptos, disposiciones o normas que hacen referencia a un modelo de características perfectas o permisibles para el ser humano y su medio ambiente.

Las vibraciones se definen como un cambio temporal y periódico de una masa, caracterizándose por su frecuencia e intensidad.

Existe una norma internacionalmente reconocida y aplicada en la ISO 10816, que establece si el equipo está trabajando dentro de los rangos de vibración correctos, siendo lo ideal recoger datos reales y ver las tendencias.

En este contexto, se puede comprender la importancia de identificar la falla que pueda existir en la bomba, no solo por acatar las normas y disposiciones establecidas; pues, entendemos que pasa por un grado de permisibilidad y tolerancia, tanto para el hombre, como para la máquina, manteniendo los preceptos para la conservación de la armonía del ambiente.

1.3.1. Justificación social

La puesta en marcha de esta bomba dentro del circuito de lixiviación aumentará significativamente la labor en otras áreas como en el PAD, laboratorio metalúrgico, laboratorio químico, entre otros. Este aumento de carga laboral significará la apertura de nuevos puestos de trabajo, siendo las personas de comunidades, dentro del área influencia del proyecto minero, las beneficiadas.

1.3.2. Justificación económica

Al lograr mantener los parámetros de vibración dentro de los estándares, se controlarán las averías en los equipos, se evitarán paros no planificados, además se podrá incrementar la disponibilidad de la planta que es el objetivo principal de la empresa solicitante, Minsur – Pucamarca.

Lo que asegura no variar los presupuestos económicos establecidos para el proyecto y su operación.

1.3.3. Justificación ambiental

Una de las características de la vibración es la emisión de sonido, pues se debe trabajar para no sobrepasar los 60 decibeles permitidos por la OMS y así evitar que llegue a considerarse como contaminación sonora,

lo que podría afectar no solo al personal, sino también a la flora y fauna del lugar.

1.4. ALCANCES Y LIMITACIONES

La presente investigación tiene como periodo de referencia, el año 2019. Teniendo en cuenta su delimitación geográfica, la superficie del proyecto perteneciente a la C.C. Vilavilani y el campamento a la C.C. Palca; el impacto del estudio puede alcanzar a todo el sistema de instalación que se implique con el funcionamiento directo e indirecto de la bomba Barren vertical.

Según con el cronograma del proyecto, se contó con 19 días para la ejecución del montaje e instalación de la línea y bomba Barren, para ello se contó con alcances teóricos de los manuales, documentos como el requerimiento, adquisición, traslado, entre otros similares, que tenían que ver con la bomba Barren e informes levantados durante el todo el proceso.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo general

- Determinar la causa raíz de vibración excesiva presente en una bomba Barren vertical instalada en la UM Pucamarca – Minsur.

1.5.2. Objetivos específicos

- Verificar la implementación; montaje e instalación de una nueva bomba Barren vertical.
- Determinar la causa raíz de la vibración excesiva de la bomba Barren vertical.
- Establecer la ampliación de la capacidad operativa de la UM Pucamarca.

1.6. HIPÓTESIS

Mediante el uso de instrumentos para ensayos no destructivos de los componentes que conforman la bomba Barren vertical se identificaron las posibles variables de fallas que provocan la vibración excesiva.

1.6.1. Hipótesis específicas

- Mediante pruebas en vacío se demostrarán los niveles de vibración del conjunto.
- Haciendo uso de equipos específicos se determinará la vibración producida por cargas externas.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

Minsur tiene una capacidad actual de 17 500 toneladas de mineral por día; sin embargo, su objetivo principal actual es incrementar la capacidad de la Planta a 24 000 toneladas por día ya que ha logrado identificar las holguras en diferentes áreas.

Los antecedentes de la problemática que se mencionan en la presente tesis hacen referencia a investigaciones anteriormente realizadas en el ámbito nacional e internacional. Entre las investigaciones encontradas se pueden mencionar las siguientes.

2.1.1. Antecedente 1

Hace más de 30 años gracias al análisis de vibraciones, se puede supervisar y diagnosticar fallas mecánicas, para nuestro estudio es vital dicha teoría. Para comprender con mayor exactitud la causa del exceso de vibración de nuestro estudio, citaré a Anderson Barboza, egresado de la Pontificia Universidad Católica del Perú; quien en su trabajo de tesis desarrolla, la detección de fallas en una bomba centrífuga basándose en

el método de análisis de vibraciones; pues bien, con la información desarrollada en su trabajo se pudo comprender mucho mejor los estándares que rigen para los límites de vibración permisibles, además que detalla la manera en la que, él pudo seleccionar el transductor que lo llevo a detectar la falla de su estudio (Barboza, 2013).

2.1.2. Antecedente 2

Ahora, no solo se debe tener absoluto conocimiento del funcionamiento de la bomba en sí, al mismo tiempo se tiene que comprender el proceso en el que estaría involucrada; por lo que se analizó el trabajo de Uldarico Asto, egresado de la Universidad Nacional del Centro del Perú; quien explica en su publicación de tesis, el diseño del sistema de bombeo en la unidad minera de Buenaventura y el control de pérdidas de energía, ambos puntos involucrados en el proceso de lixiviado de dicha unidad minera, proceso de extracción que tienen en común tanto Buenaventura como Minsur en su unidad minera de Pucamarca (Asto, 2014).

2.1.3. Antecedente 3

Por otro lado, el trabajo de Joel Quiliche, nos muestra una perspectiva más amplia acerca de una bomba ya operativa, que sufre deterioro prematuro de sus partes como sellos mecánicos, fajas,

rodamientos, etc., ocasionados por el exceso de vibración. En su afán de incrementar la vida útil de dichos componentes, para así disminuir costos, nuevamente nos lleva por teoría de vibraciones, claro que en su caso la incluye en los mantenimientos predictivos y así lograr la optimización que se espera, esto ayuda a comprender cuáles serían los daños futuros de no encontrar la causa del exceso de vibración presente en nuestro trabajo (Quiliche, 2019).

2.1.4. Antecedente 4

Por último, también se analizó antecedentes internacionales como el de Francisco Albayay, egresado de la Universidad Técnica federico Santa María de Valparaíso - Chile, quien describe cómo diagnosticar y solucionar problemas de vibración excesiva en la descarga de bombas y más allá de la teoría de vibraciones que también es vital para nuestro objetivo, se comprendió mucho mejor el trabajo de la estandarización y la importancia de compartir resultados reales, problemas reales de la industria para así junto a las normas internacionales de estandarización poder tener y comprender un lenguaje global y mucho más simple evitando daños, reduciendo costos para poder realizar nuestras actividades de la mejor manera (Albayay, 2015).

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Proceso extracción de oro y plata de la UM Pucamarca

Chancado: La función principal del chancado es reducir el tamaño de mineral, a un tamaño óptimo, para la posterior molienda, el proceso involucra dos acciones; en la primera está el transporte que proviene del yacimiento y descarga sobre las tolvas de alimentación de la chancadora; y la segunda es el chancado en sí, que conforme gira excéntricamente el eje, las rocas caen y se aplastan contra los cóncavos rompiéndose en pequeños fragmentos de 5 pulgadas.

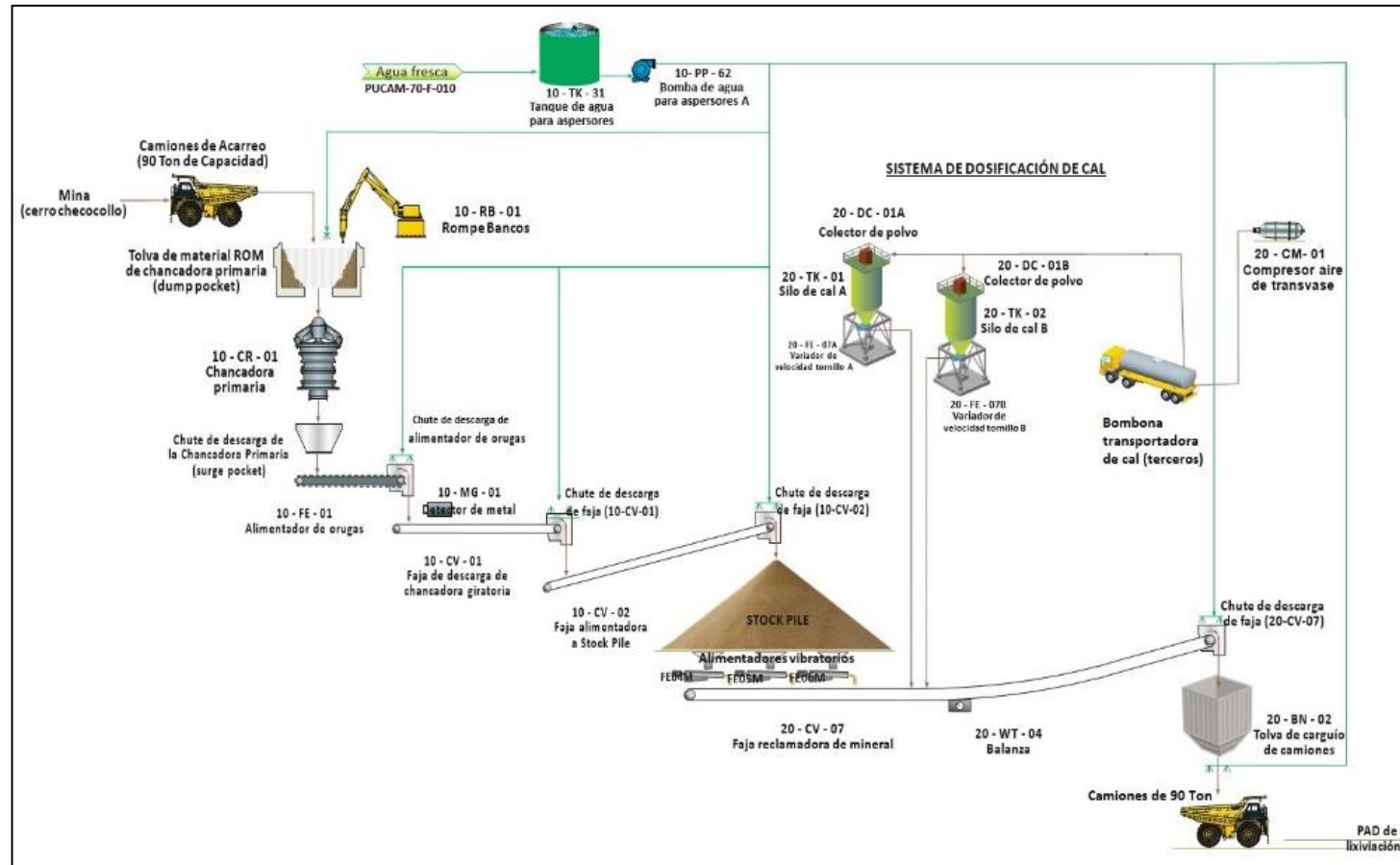


Figura 1. Proceso de chancado
Fuente: Escobar Nino, Justo (2018)

Lixiviación: Es un proceso de carácter hidrometalúrgico que se desarrolla después del proceso de chancado, pues la roca reducida es llevada a la plataforma impermeabilizada o PAD, donde es esparcida en bancos o andenes, luego se instalan mangueras de manera manual y se riega cianuro a través de riego por goteo, toda esta solución es captada por tuberías y enviadas hacia la poza PLS de solución rica en mineral, que posteriormente es bombeada al circuito de adsorción.

Planta – ADR – circuito de adsorción: Donde a través de procesos químicos se extrae el oro y la plata, por un lado, el líquido residual es enviado al tanque Barren para ser bombeado y nuevamente iniciar otro proceso de lixiviación.

Proceso de refinería: El mineral extraído (oro y plata) son enviados a la zona de fundición y generar las barras dore que es el producto final de la UM Pucamarca (Escobar, 2018).

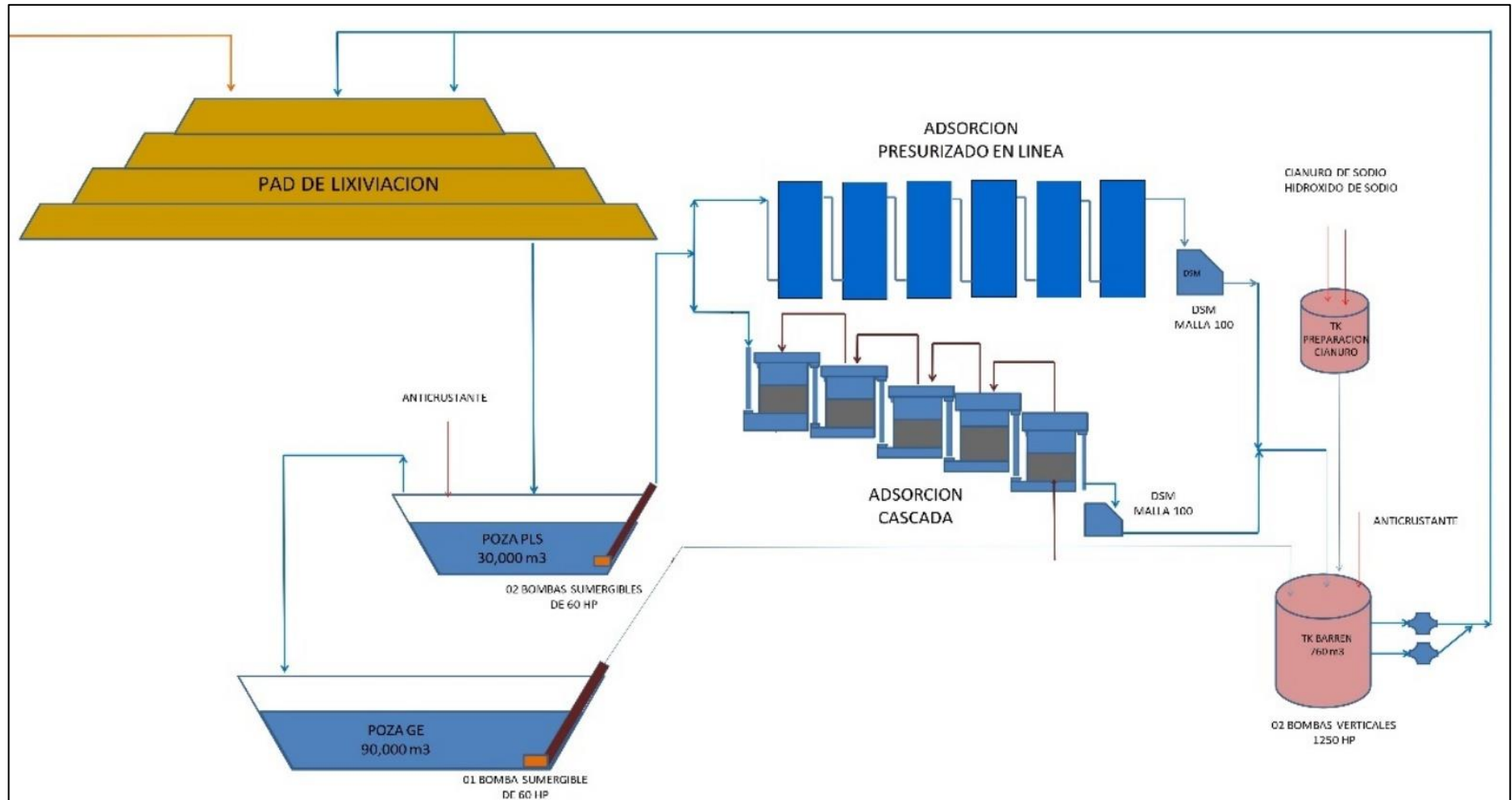


Figura 2. Proceso de lixiviación

Fuente: Estudio de Pre-Factibilidad HATCH (2018)

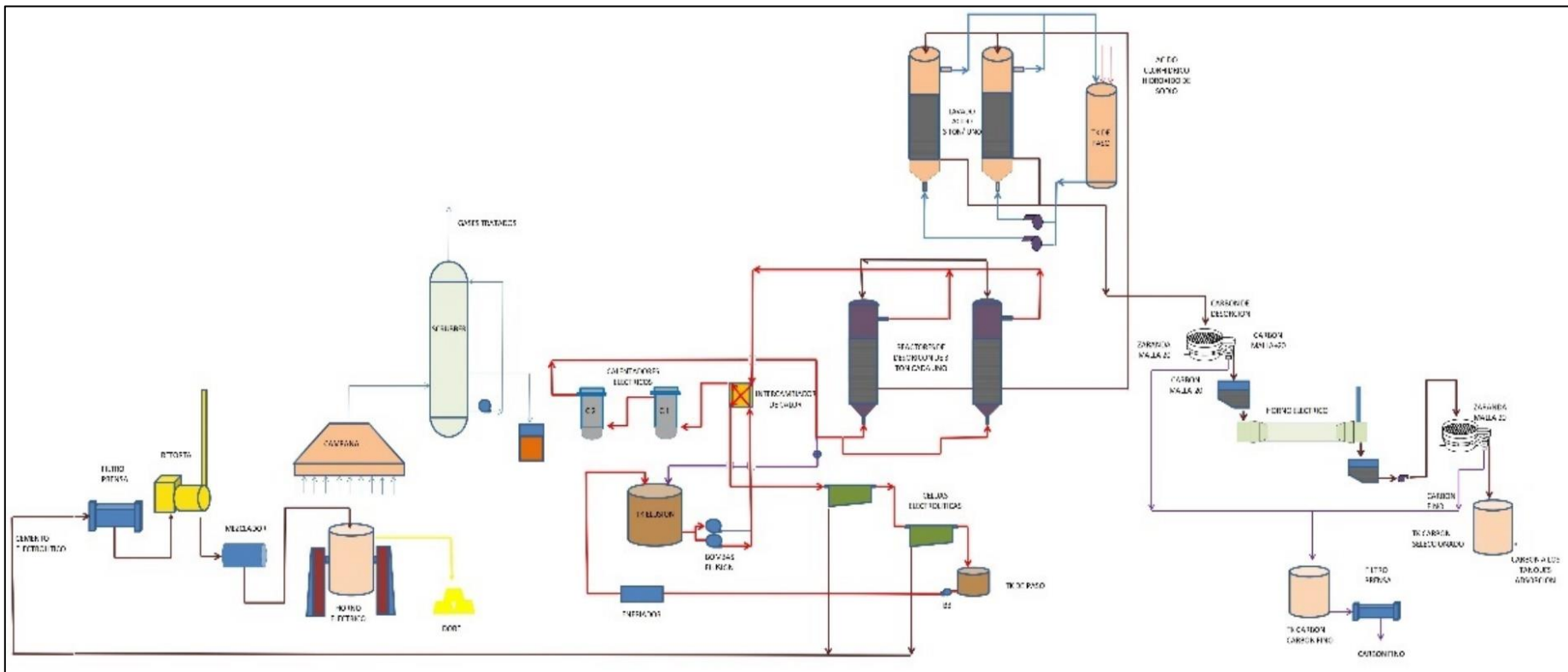


Figura 3. Proceso de Refinería

Fuente: Estudio de Pre-Factibilidad HATCH (2018)

2.2.2. Bombas

Alguna vez se ha puesto a pensar ¿cómo llega el agua a su casa? Pues el proceso que se tiene ahora, no es el mismo que se tenía hace algunos siglos atrás, veamos, la necesidad no ha cambiado el líquido es vital para la supervivencia de nosotros los humanos y todos los seres vivos. Antiguamente, lo único que se conocía eran los cauces naturales del agua, eran flujos indomables; sin embargo, la expansión de posesión de nuevos territorios para vivir del hombre antiguo se limitaba a lo fundamental, a la existencia del agua, pero con el tiempo la necesidad crecía, por que crecía la población en general y es por ello, gracias a la curiosidad e investigación de los hombres de aquella época, se descubrió que existía agua bajo la tierra, ahora bien, ya habían encontrado agua, la única interrogante que surgía y surgió por mucho tiempo era: ¿cómo extraer dichas masas de agua?.

Los antiguos guiados por instinto y lógica, cavaron hasta llegar a los pozos profundos que almacenaban agua de algún acuífero y al llegar a este, el agua debía brotar como en una fuente, y esto si sucedía en algunos lugares donde los acuíferos no eran tan profundos, que después fue conocido como pozos artesianos. Sin embargo, en otros lugares por más hondo que se cavara no se llegaba a encontrar las masas de agua.

Por otro lado, los hombres de aquella época no eran tan primitivos pues ya habían desarrollado varias herramientas para sus necesidades. Se debía derribar algunos otros obstáculos que se presentaban al momento de cavar y para ello decidieron hacer uso de sus herramientas, por cuanto, el mayor problema que tenían, era que cada vez que cavaban más profundo, el pozo ancho se derrumbaba, lo que impedía que llegaran más hondo, pues bien, no era necesario un pozo ancho, tan solo bastaba crearle un camino al agua, camino que podía ser angosto y con la ayuda de barrenos empezaron a hacer agujeros en la tierra. A continuación, se grafica la imagen de un barreno y se recomienda analizar por un instante la forma de esta antigua herramienta.



Figura 4. Barreno

Fuente: Proyecto Raíces de Peralêda (2017)

Con el barreno, ya se podía cavar más hondo, el único detalle que se debía evitar era, que la tierra volviera a ingresar al agujero hecho, para ello se necesitaba un canal de protección y esa función la podían cumplir muy bien algunos tubos, que no solo protegían el agujero, también servían de guía y bajaban según se iba cavando, una vez establecido el contacto con el agua, se requería de un último esfuerzo para impulsar el líquido desde abajo hasta la superficie; aquí debemos recordar la forma que tenía el barreno, la punta como la de un lápiz y el cuerpo en forma de rosca en espiral, esta forma facilita el nuevo trayecto que tomara el agua; por último, sin seguir cavando, debía mantenerse el movimiento rotativo continuo del barreno; que generaba la captación de agua; y un movimiento vertical, pues este movimiento genera dentro del tubo el principio de Bernoulli, logrando así, la extracción del agua.

Y ¿cómo mantener el movimiento constante? Para ello se necesita una fuente continua de energía que como se trató en el relato anterior fue un caballo, y con el transcurso de los años los cambiaron por molinillos de viento, molinos de agua, etc. y se añadió el uso de motores que mantienen dicha energía y hasta la transforman.

Ahora, surge la pregunta ¿Por qué se hizo tan extensa la referencia al proceso de bombeo? más aún, en uso cotidiano y doméstico, y es que

años más tarde esta necesidad de bombear agua se extendió hasta otras industrias y no solo agua, si no también otros fluidos.

Dentro de las industrias que aplicaron y que hasta la actualidad trabajan con el proceso de bombeo, está la minería y de acuerdo con sus necesidades durante los años se han diseñado distintos tipos de bombas con nuevas tecnologías y sobre todo recurriendo a mayor cantidad de principios.

Una vez comprendido el proceso de bombeo, podemos entender que es lo que sucede dentro de una bomba, nuestro fluido ideal, que sería el agua, al no tener viscosidad, ni rozamiento y es incompresible, se encuentra en movimiento o circulación por un conducto que para nosotros serían los tubos, entonces, la energía del fluido se mantiene constante en cada punto de su recorrido.

Para entenderlo con mayor precisión, revisaremos el principio de Bernoulli en la siguiente relación:

$$\textit{Velocidad} \times \textit{Presión} = \textit{Energía}$$

Es importante conocer que la energía obtenida es constante, por ello Bernoulli determina que, si la velocidad es mayor, la presión disminuirá y viceversa.

Un equipo de bombeo, compuesto por la bomba y el motor son parte, cuya función es transformar la energía que adquiere un fluido en forma de mayor presión y velocidad.

Por ejemplo, existen bombas que cambian de posición a cierto fluido, como todo lo que se ha visto hasta el momento de bombas.

Sin embargo, existen equipos de bombeo que realizan diferentes tareas, como las que se usan en los oleoductos en donde las cotas de altura, diámetros de tubería y velocidades son iguales, siempre y cuando la presión sea incrementada para vencer las pérdidas de fricción que pudiera darse en la conducción del fluido en este caso el petróleo.

También existen equipos de bombeo que trabajan con presión y altura igual, incrementando solo la velocidad, a simple vista parece un concepto simple; sin embargo, para el desarrollo del diseño, de este tipo de bombas fue necesario conocer a detalle las ecuaciones fundamentales de mecánica de fluidos.

Por último, se investigó lo que sucedió con las turbinas, que realizan todo el proceso, pero de manera inversa, pues transforman la energía de un fluido en energía mecánica, en otras palabras, una bomba sería un generador hidráulico, mientras que una turbina sería un motor hidráulico.

Clasificación: Hasta el momento, hemos mencionado cuatro grandes grupos en general de bombas, sin embargo, al ser tan variados los tipos que existen, es conveniente hacer referencia a una adecuada clasificación, para ello, se tomó como fuente la última edición del “Hydraulic Institute”.

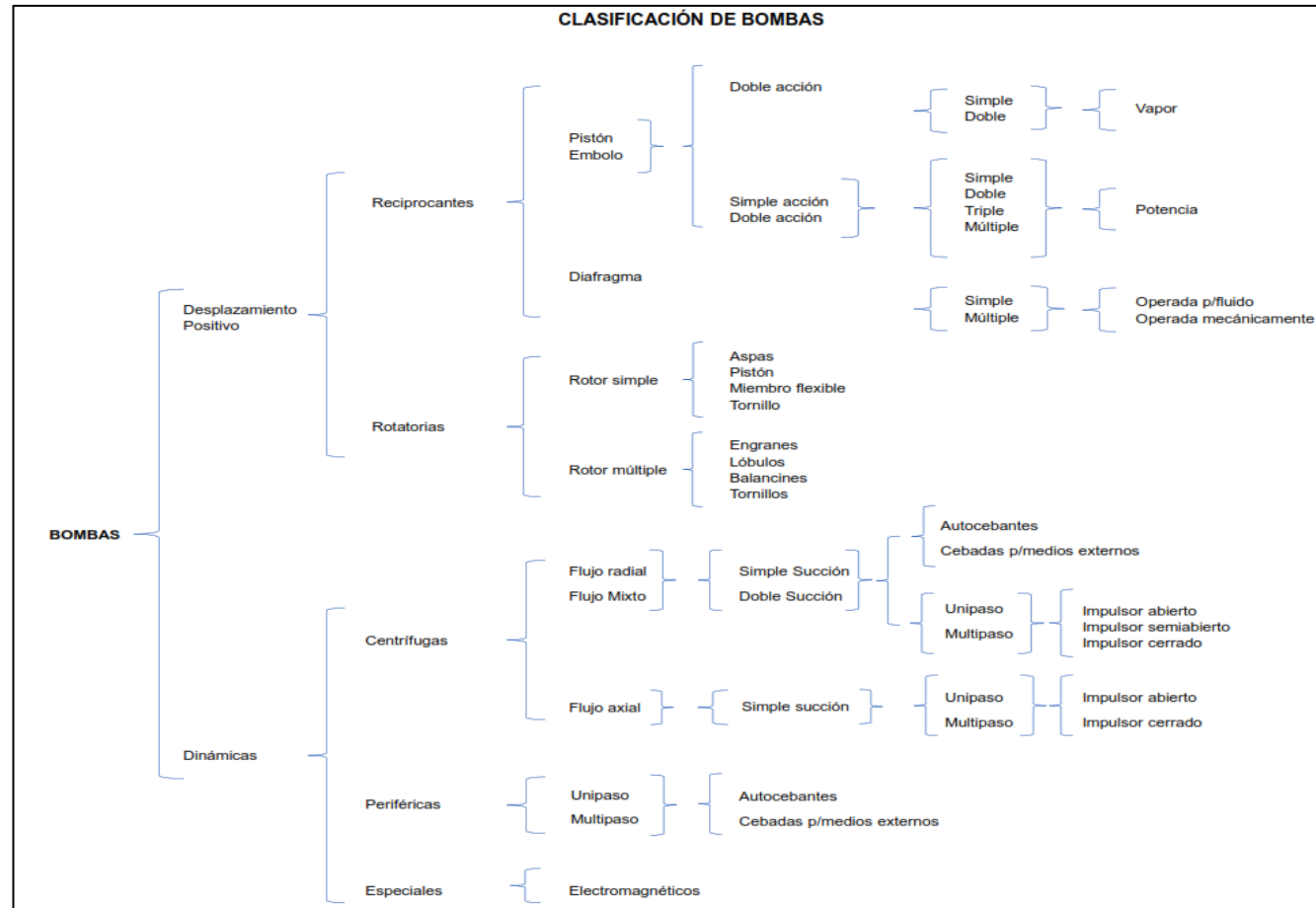


Figura 5. Clasificación de bombas

Fuente: Viejo Zubicaray Manuel - Bombas (2000)

Es preciso mencionar y ubicar en la clasificación al equipo de bombeo vertical o bomba vertical sumergible Barren, que es el centro de nuestro estudio actual, dentro de la clasificación se ubica como una bomba dinámica, centrífuga, de flujo mixto, simple succión, multipaso e impulsor cerrado. Este tipo de bomba tiene como principal ventaja la eliminación del problema de cebado que aqueja a la mayoría de las bombas, incrementando su disposición, ya que puede funcionar en cualquier momento, al momento de iniciar el funcionamiento la aspiración debe dar con cierta profundidad, esto con respecto al nivel libre del líquido, si esta fuese menor a 2 o 3 veces el diámetro del orificio de aspiración se generarán remolinos que introduce aire a la bomba, ocasionando una pérdida de caudal y por ende un deficiente funcionamiento. La otra ventaja resaltante de este tipo de bombas es que requieren menor espacio horizontal, y no es necesaria la empaquetadura eliminando los inconvenientes que conlleva tenerla, todo ello es muy favorable pues reduce visiblemente sus costos, de por si los equipos de bombeo son muy costosos no solo en cuanto a su adquisición sino también a su mantenimiento, sin embargo, con este tipo de bombas los costos se reducen (Fernandez, 2010).

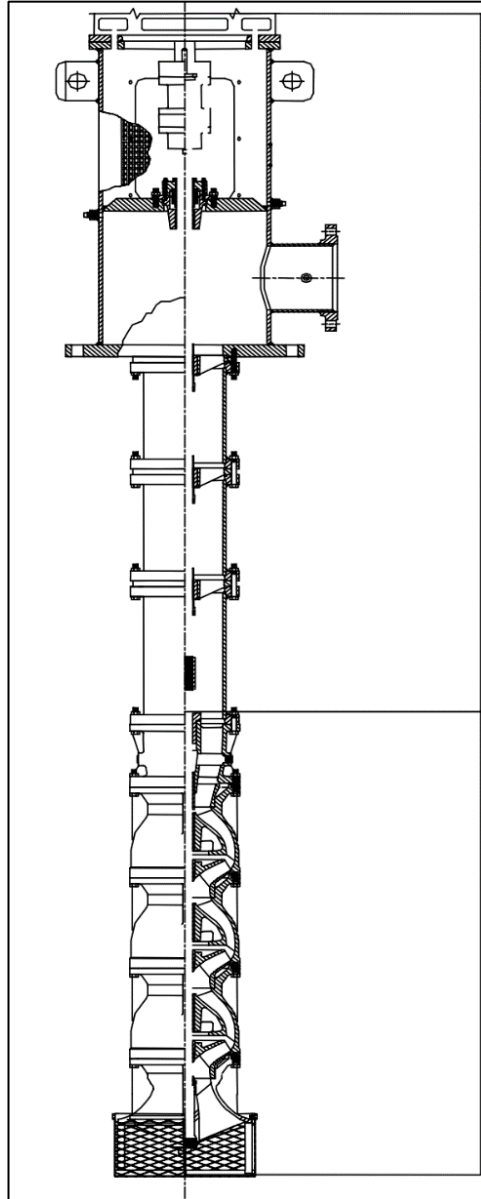


Figura 6. Bomba Vertical

Fuente: Manual de Instalación, operación & mantenimiento bomba vertical - Flowserve – (2015)

2.2.3. Vibración

La vibración en un cuerpo o máquina es originada por fuerzas internas o externas que actúan en este; y que la proporción y los valores de vibración se pueden determinar a través del análisis de vibración que ayuda a encontrar la cantidad de la fuerza de excitación que puede estar comprendido dentro de los 6 grados de libertad de los cuerpos.

2.2.3.1. Movimiento armónico sencillo

Una de las formas más sencillas de explicar el movimiento armónico es idealizar una masa suspendida a través de un resorte que tiene solo un grado de libertad. Si la masa es desplazada una cierta distancia y es soltada, el resorte se encargará de regresarla al punto de equilibrio, pero la masa obtendrá energía cinética que hará que rebase su punto de descanso en ambos sentidos hasta detenerse por la energía potencial del resorte. En la siguiente ilustración se puede apreciar el movimiento de la masa en un determinado tiempo y su comportamiento:

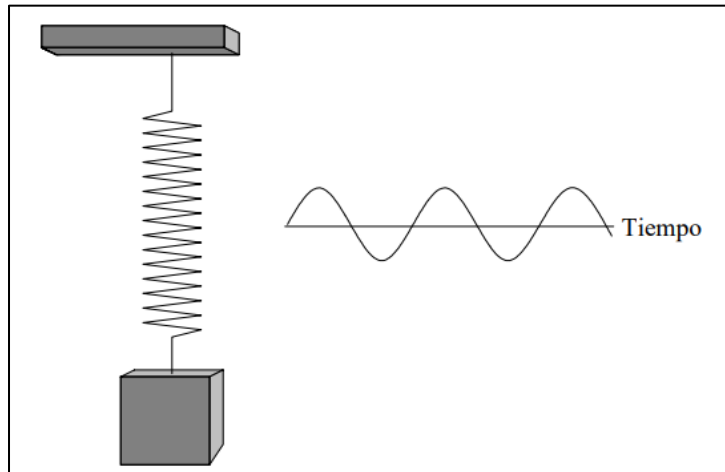


Figura 7. Movimiento armónico sencillo

Fuente: Glen (2010)

Si se traslada este principio a la realidad, se observa que en los equipos existe la fricción, esto significa que la amplitud de la vibración se vea afectada, disminuyendo gradualmente ya que la energía generada por la fricción se convierte en calor.

Las siguientes definiciones componen el movimiento armónico sencillos de los cuerpos:

T =el periodo de la onda

El periodo es el tiempo que necesita para completar un ciclo o completar el desplazamiento de ida y retorno. El periodo lo podemos medir en segundos o milisegundos según la velocidad de la onda.

$$F = \text{la frecuencia de la onda} = 1/T \quad [1]$$

La frecuencia se puede definir como la cantidad de ciclos en un periodo de tiempo y es el recíproco del periodo.

2.2.3.2. Ecuaciones de movimiento

Si graficamos el desplazamiento que experimenta un objeto sometido al movimiento armónico simple en un periodo de tiempo, como la imagen anterior, resultara una curva en onda seno o senoidal que se representa con la siguiente ecuación:

$$d = D \sin (\omega t) \quad [2]$$

Donde:

d = desplazamiento instantáneo

D = desplazamiento máximo o pico

t = tiempo

Para determinar qué tan rápido o la razón de variación respecto a otra, se puede hallar con la siguiente ecuación:

$$v = \frac{dd}{dt} = \omega D \cos(\omega t) \quad [3]$$

Donde v = velocidad instantánea

La aceleración que se origina por el movimiento se puede definir calculando qué tan rápido está cambiando la velocidad en un determinado momento.

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2d}{dt^2} = -\omega^2 D \sin(\omega t) \quad [4]$$

Donde a = aceleración instantánea

Revisando las ecuaciones anteriores se puede determinar que la velocidad va en proporción del movimiento multiplicado por la frecuencia; así mismo, la aceleración es proporcional a la potencia cuadrada de la frecuencia multiplicado por el desplazamiento.

2.2.2.3. La medición de amplitud de vibración

Las siguientes definiciones se utilizarán para medir la amplitud de las vibraciones:

La amplitud Pico (Pk): Se representa como la máxima distancia de una onda al punto cero.

La amplitud Pico a Pico (Pk - Pk): Se representa como la distancia de un pico positivo a un pico negativo. Para una onda senoidal, el cálculo de pico a pico es el doble del valor pico, esto solo cuando las ondas son simétricas.

La amplitud raíz del promedio de los cuadrados (RPC o RMS) en sus siglas en inglés: Se determina calculando la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados de los valores de la onda en un cierto tiempo. Para el caso de ondas senoidales el valor RPC o RMS será igual a 0,707 del valor pico. El valor de RPC o RMS es proporcional al área que se encuentra debajo de la curva.

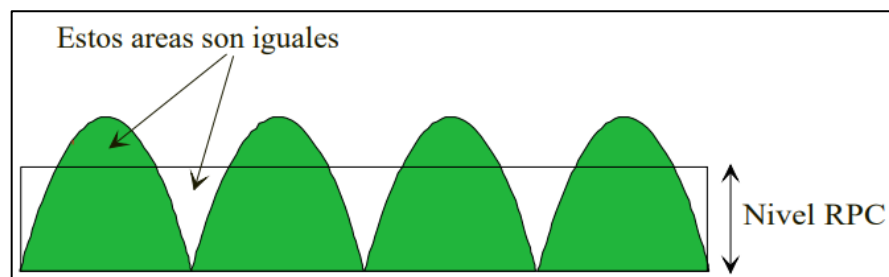


Figura 8. Amplitud RPC

Fuente: Glen (2010)

2.2.2.4. Definición de fase

La fase ayuda a medir la diferencia de tiempo que hay entre dos ondas senoidales, que se mide en ángulos, grados o radianes. Esta diferencia entre dos ondas se denomina a veces como desplazamiento de fase. Este desplazamiento puede sufrir un retraso y un avance de fase como sea el caso. En la gráfica se representa la diferencia de fase entre dos ondas senoidales.

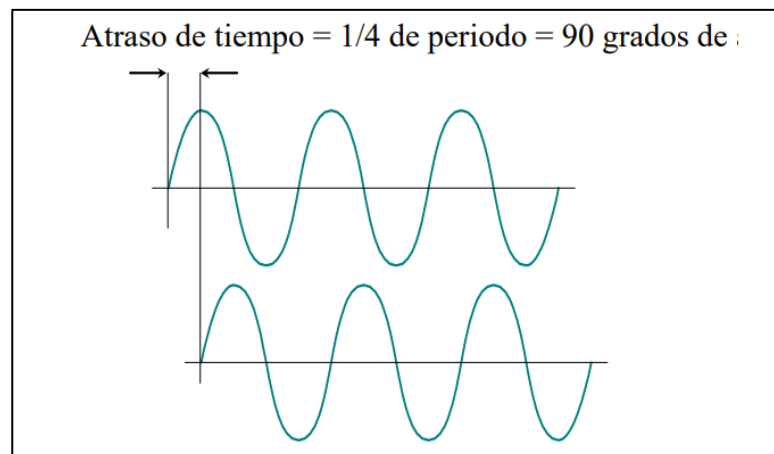


Figura 9. Definición de fase

Fuente: Introducción al análisis de vibraciones. Glen (2010)

2.2.2.5 Monitoreo de vibración en máquinas

A través del análisis de vibraciones, aplicado correctamente permite detectar por más pequeños que sean los defectos mecánicos mucho antes que se conviertan en una amenaza contra la integridad de equipo o máquina. De esta forma, se puede estructurar un mantenimiento predictivo

óptimo para el mejor desempeño de los equipos y olvidar el tipo de mantenimiento histórico “que funcione hasta que falle”.

2.2.2.5. Ubicación de los puntos de prueba

Casi siempre se debe colocar el transductor de monitoreo de vibraciones lo más cerca posible a los rodamientos, donde habrá una separación metálica sólida entre el sensor y el rodamiento. La siguiente imagen dará algunos ejemplos de dónde es el lugar adecuado para tomar los valores de vibración con el sensor.

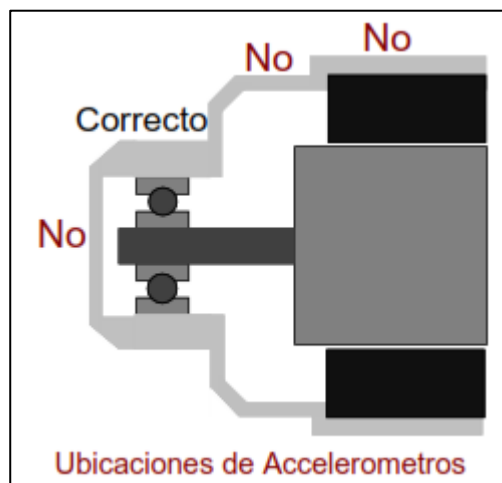


Figura 10. Ubicación de los puntos de Prueba

Fuente: Introducción al análisis de vibraciones. Glen (2020)

Por lo general para motores de menos de 50HP un solo punto de monitoreo es lo más adecuado; sin embargo, para motor de más de 50HP

cada rodamiento que constituya el motor debe tener su propio punto de monitoreo.

2.2.2.6. Mediciones triaxiales

Para poder determinar los valores de vibración presente en una máquina es necesario obtener la información en tres direcciones, que son, Axial, Radia y Tangencial. La siguiente imagen da una referencia de cómo se debe colocar los sensores.

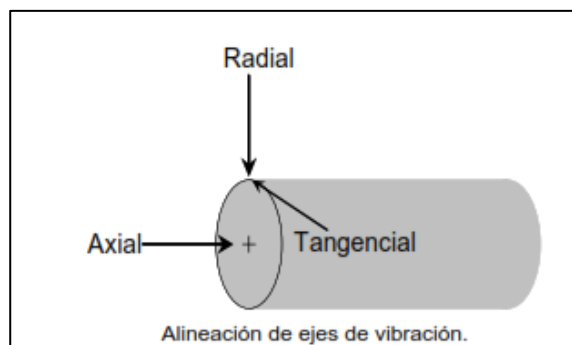


Figura 11. Puntos de Mediciones Triaxiales

Fuente: Introducción al análisis de vibraciones. Glen (2010)

El siguiente diagrama grafica las seis orientaciones que debe tener el sensor en una máquina original (Glen, 2010).

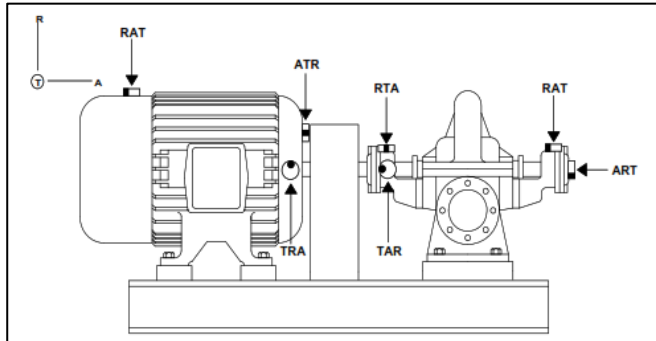


Figura 12. Orientación de Sensores para una maquina original
Fuente: Introducción al análisis de vibraciones. GLEN W, 2010

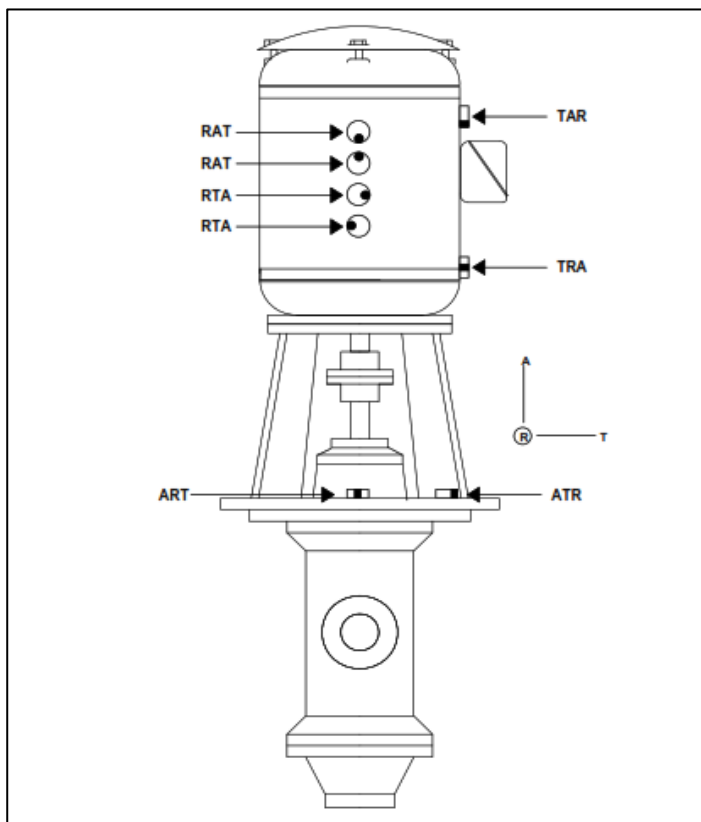


Figura 13. Orientación de sensores para una máquina vertical
Fuente: Introducción al análisis de vibraciones. Glen (2010)

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Para el desarrollo de tesis se realiza una investigación explicativa. Se prueba el rendimiento de la bomba de acuerdo con el procedimiento. Las curvas se extraerán de los datos de prueba para mostrar la altura, la potencia consumida, la eficiencia frente al flujo y parámetros de vibración.

3.1. POBLACIÓN Y MUESTRA

Se toma como unidad de estudio al conjunto de piezas que conforman la bomba Barren vertical, instalada para el proceso de lixiviación, como parte del requerimiento de ampliación operacional, teniendo como marco muestral la Unidad Minera Pucamarca – Minsur, que se ejecutará mediante el muestreo a través de estrategias metodológicas.

3.2. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA RECOLECCIÓN DE DATOS

3.2.1. Materiales e instrumentos

- Analizador de vibraciones de la marca CSI (Emerson) Modelo B21404 número de serie B21401161736 y Certificado de calibración de acuerdo con la normativa ISO 9001:2008 y ANSI/NCSL Z540-1
- Nivel de precisión Mitutoyo
- Reloj comparador Mitutoyo
- Martillo nodal

3.2.2. Técnica

- Prueba de impacto motor seco: Debido a la alta vibración se realizan pruebas de impacto al motor fuera de la bomba a fin de observar cual es la correcta *Reed Frequency* del motor.
- Nivelado: El proceso de nivelado ayuda a determinar el desnivel entre dos o más objetos con respecto a un plano de referencia.

- Nivelado de placa base de bomba vertical, componentes y motor eléctrico.
- Alineamiento: Es el resultado de alinear dos o más objetos respecto a una línea recta.
- Alineamiento de bomba-caja de rodamientos, motor-caja de rodamientos.
- Prueba de impacto: Esta prueba de vibración se hace por lo general a una máquina inoperativa.

Se equipa a la máquina con uno o más sensores (transductores) de vibración, y por último se golpea la máquina con un martillo modal; la máquina emitirá vibraciones que serán recopiladas por los sensores que enviarán la información a un analizador de espectro, este último nos dará un espectro resultante que contendrá picos que representan a las frecuencias naturales de la máquina.

Se realiza prueba de impacto al conjunto bomba-motor sin carga.

Puntos de muestra paralelo y perpendicular a la descarga.

Se realiza prueba de impacto en vacío del motor eléctrico no acoplado a la bomba. Puntos de prueba parte superior al motor, paralelo y perpendicular a la descarga, parte inferior motor-brida, paralelo y perpendicular a la descarga.

3.3. EL PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

Para el procesamiento de los datos recolectados se va a realizar a través del análisis de vibración, que, para este caso particular, desarrolla la siguiente secuencia:



CAPÍTULO IV

DESCRIPCIÓN Y DIAGNÓSTICO

4.1. MONTAJE E INSTALACIÓN DE LÍNEA Y BOMBA BARREN

4.1.1. Montaje de la placa base

Nivelación de placas base: Se realiza el montaje y nivelación de la placa base dejándolo dentro de tolerancias con los parámetros establecidos por el manual del equipo (Protocolo de nivelación de la placa base). Se da continuidad a los trabajos posteriores de inyección de la lechada anti encogible de alta calidad y se espera el fraguado entre 72 a 80 horas, para proceder con el montaje de la bomba.

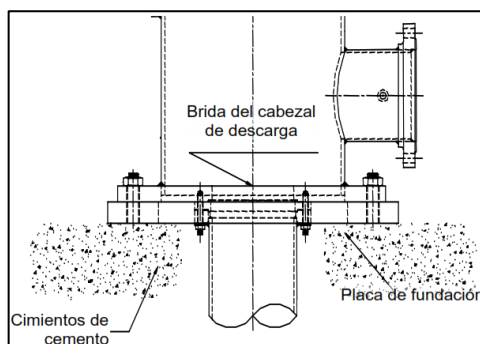


Figura 14. Medición de las tolerancias de la placa base

Fuente: Manual de Instalación, operación y mantenimiento bomba vertical Flowserve – 2015

4.1.2. Montaje del conjunto de la bomba

Montaje de bombas: Se procede con el montaje del cilindro y el conjunto de bomba.

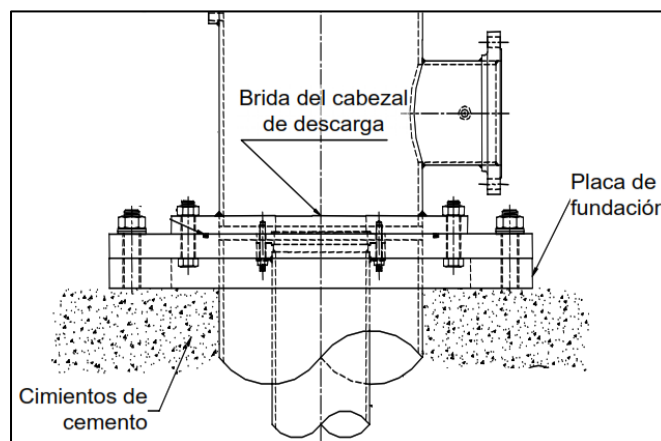


Figura 15. Montaje del soporte del motor eléctrico

Fuente: Manual de Instalación, operación & mantenimiento bomba vertical - Flowserve (2015)

4.1.3. Montaje de la caja de rodaje y motor

Control de alineamiento: Se verifica alineamiento de bomba-caja de rodamientos quedando los valores dentro de tolerancias, método de alineación con reloj comparador, la tolerancia es de 0,05mm.

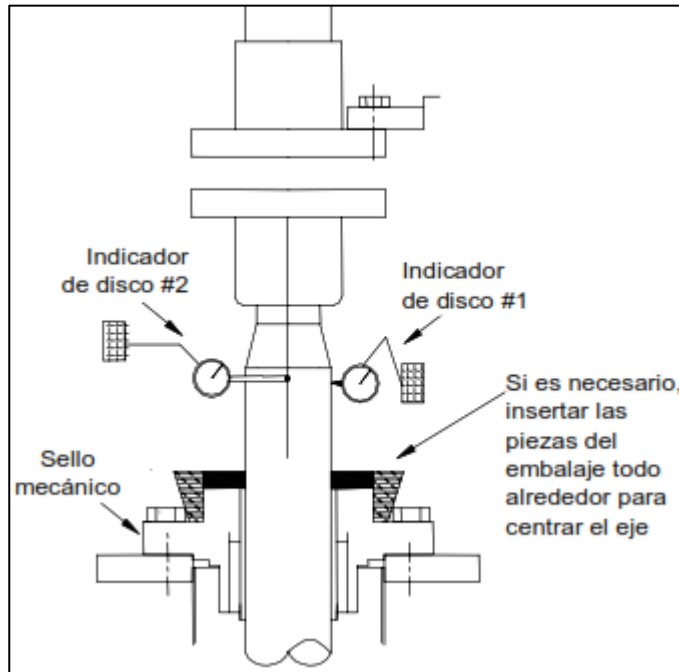


Figura 16. Verificación de alineamiento bomba

Fuente: Manual de Instalación, operación y mantenimiento bomba vertical -Flowserve (2015)

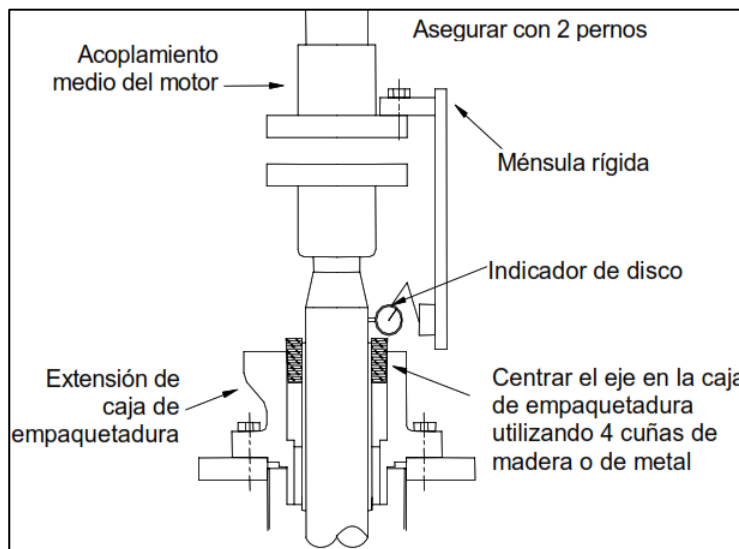


Figura 17. Regulación del levante del eje

Fuente: Manual de Instalación, operación & mantenimiento bomba vertical -Flowserve (2015)

Igualmente se procede al montaje del sello mecánico, continuando con el levante del eje dejado según placa en 0,25", se instala la línea del *flushing* al sello mecánico Plan 13, se procede con el acoplado de la bomba con caja de rodamiento, queda con el giro libre y sin restricción.

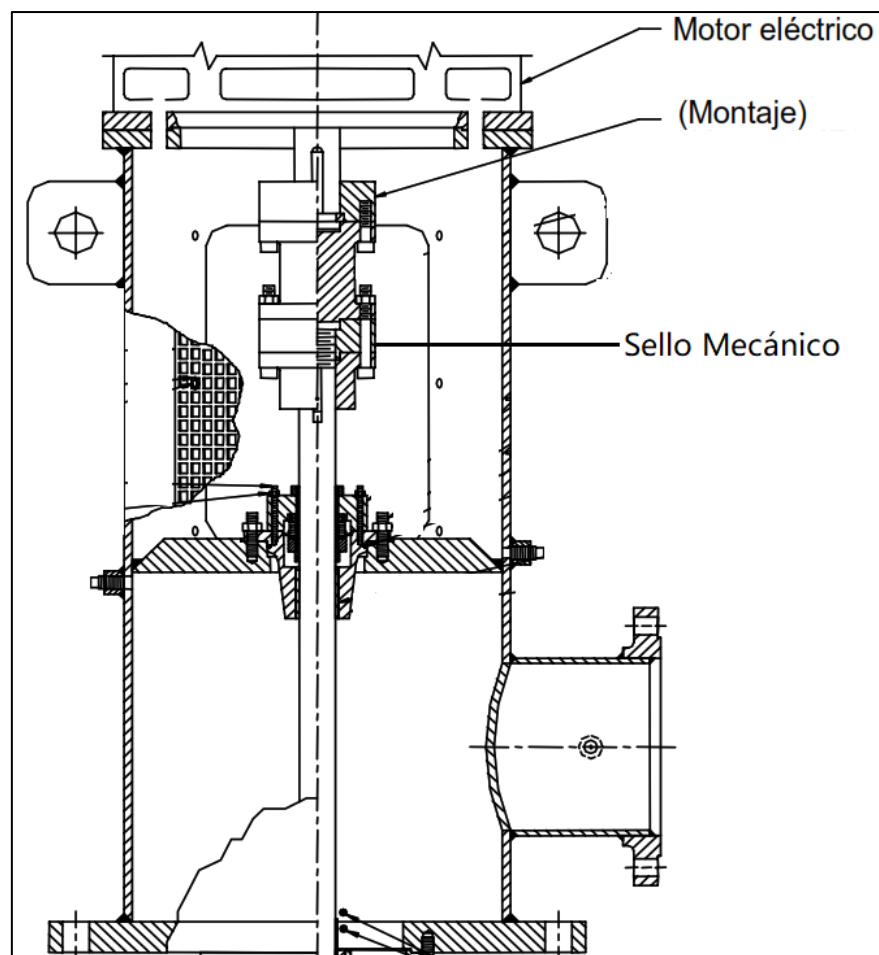


Figura 18. Sello mecánico instalado

Fuente: Manual de Instalación, operación & mantenimiento bomba vertical - Flowserve (2015)

Se procede a realizar el montaje del motor eléctrico y se realiza alineamiento del motor con la caja de rodamiento, realizado con reloj comparador quedando alineado con sus valores dentro de tolerancias.

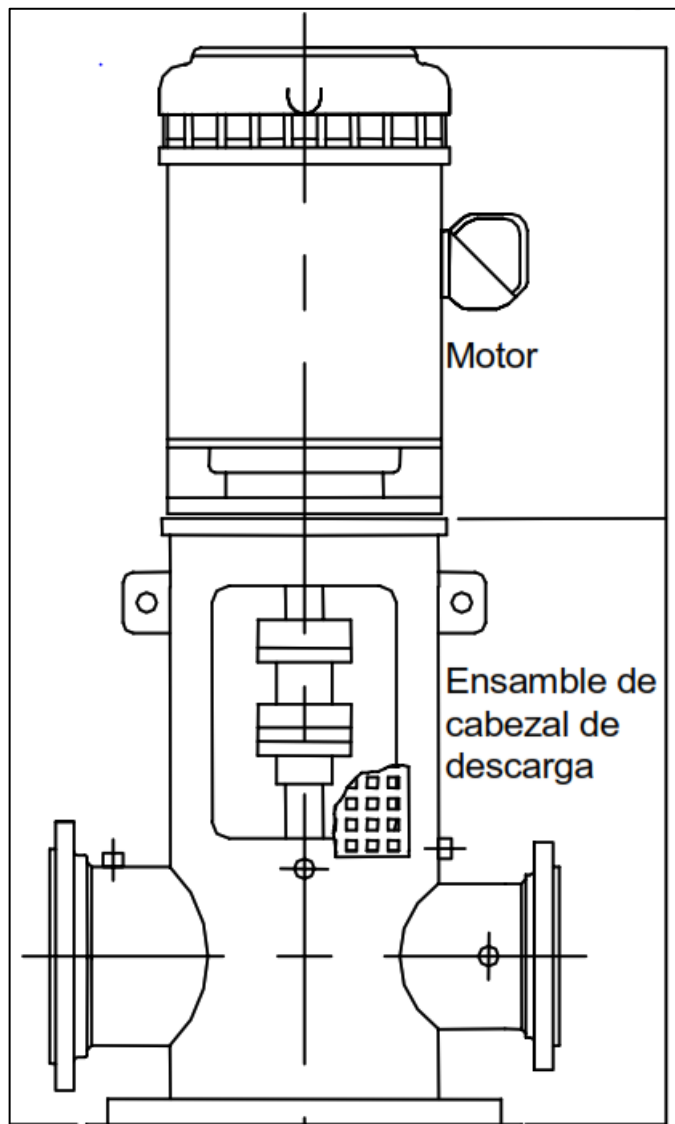


Figura 19. Montaje de motor y bomba

Fuente: Manual de Instalación, operación y mantenimiento bomba vertical -Flowserve (2015)

4.1.4. Puesta en marcha y análisis de pruebas

Prueba de Impacto con el conjunto de motor-bomba, se realizan dos pruebas de impacto con la finalidad de confirmar los resultados, el valor de frecuencia natural del sistema es como se indica a continuación:

Tabla 1

Datos de las pruebas de vibración

Posición Prueba de Impacto	Resultado en Hz
Paralelo a la descarga, brida de motor	31,2
Perpendicular a la descarga, brida de motor	34,5

Fuente: Elaboración propia

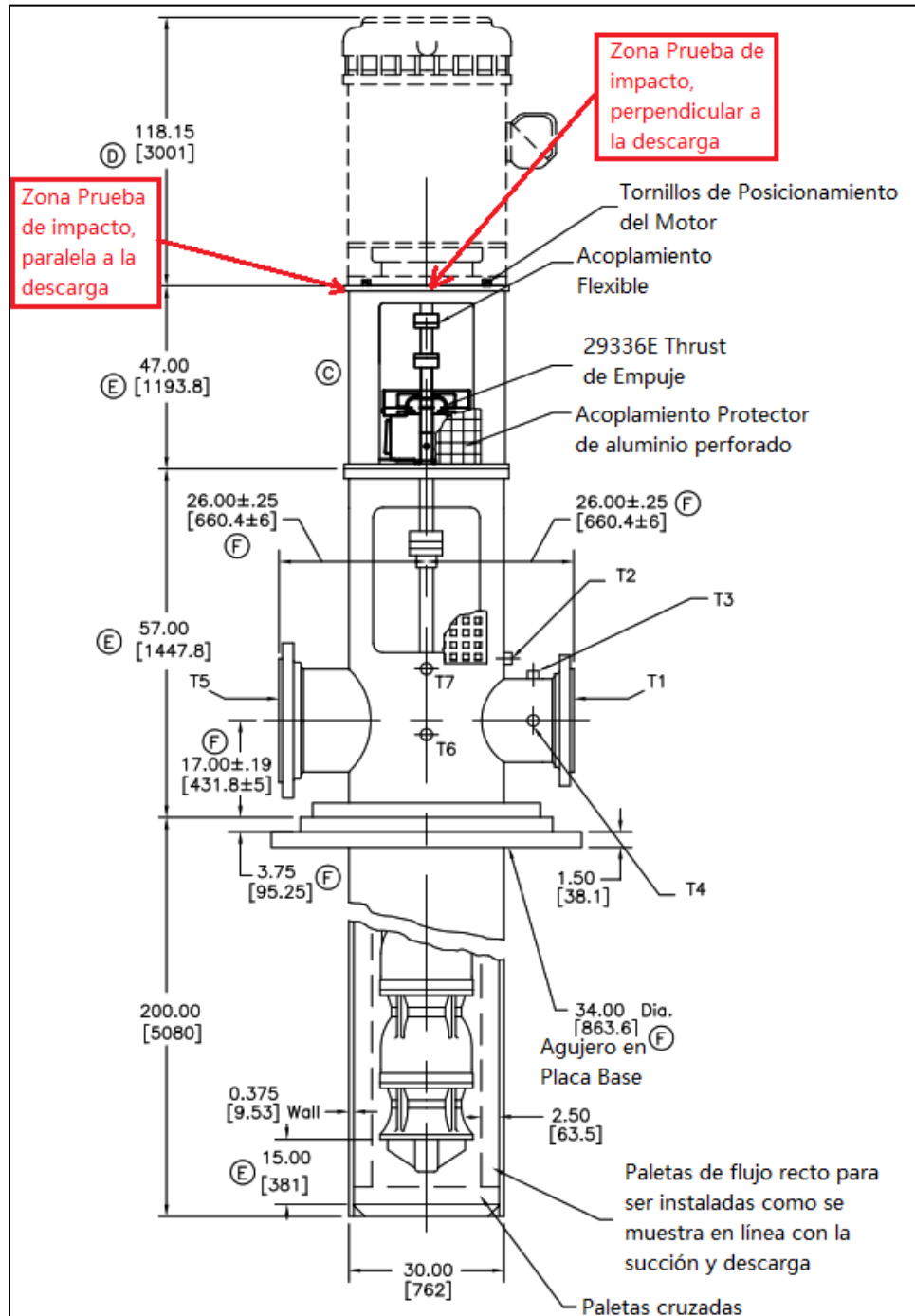


Figura 20. Zonas de Impacto

Fuente: Elaboración propia

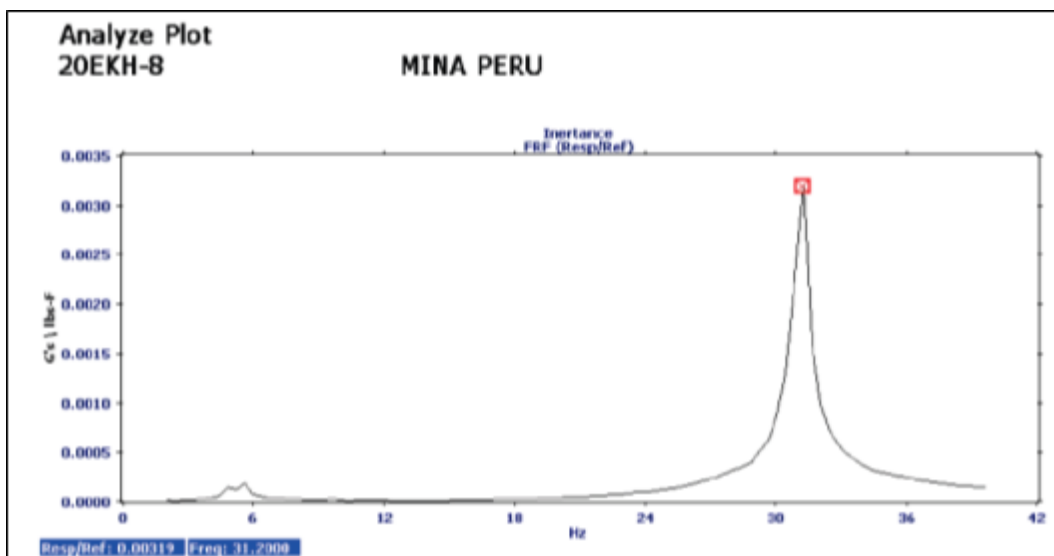


Figura 21. Resultado prueba de impacto a la descarga, brida de motor

Fuente: Elaboración propia con analizador de vibraciones

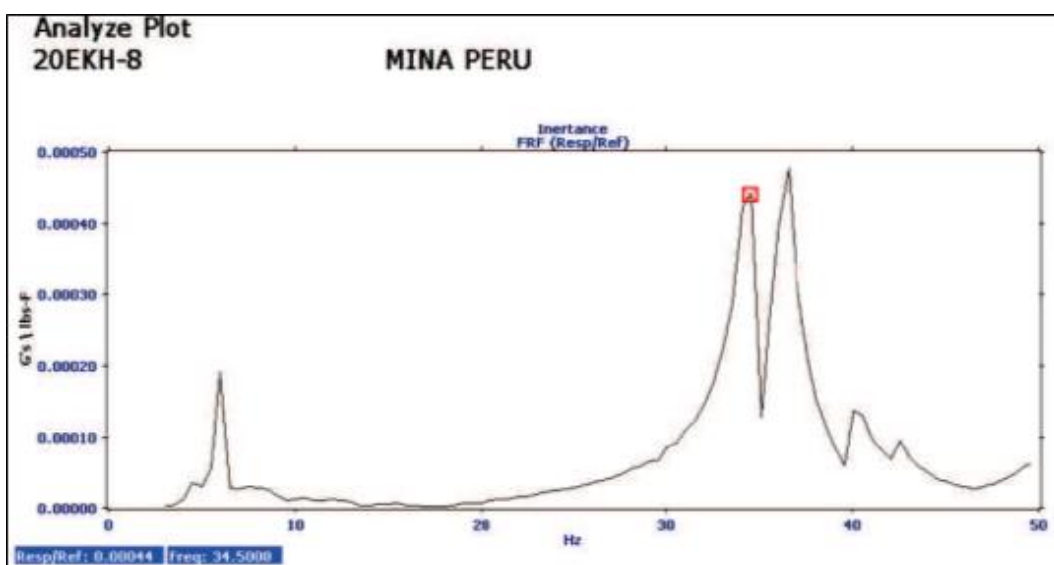


Figura 22. Perpendicular a la descarga, brida de motor, brida de motor

Fuente: Elaboración propia con analizador de vibraciones

En la prueba en vacío del motor eléctrico, no acoplado a la bomba, se observan elevados niveles de vibración a la descarga y succión de la bomba.

Toma de valores de vibración del motor eléctrico montado en la bomba, obteniendo los siguientes datos:

Tabla 2

Datos de las pruebas de vibración en el motor eléctrico

Posición acelerómetro	mm/seg [RMS]
Parte superior motor, paralelo a la descarga	15,92
Parte superior motor, perpendicular a la descarga	2,08
Parte inferior motor, brida, paralelo a la descarga	26,37
Parte inferior motor, brida, perpendicular a la descarga.	1,84

Fuente: Elaboración propia

ODS del equipo de bombeo, únicamente motor eléctrico operando en vacío a la velocidad de operación

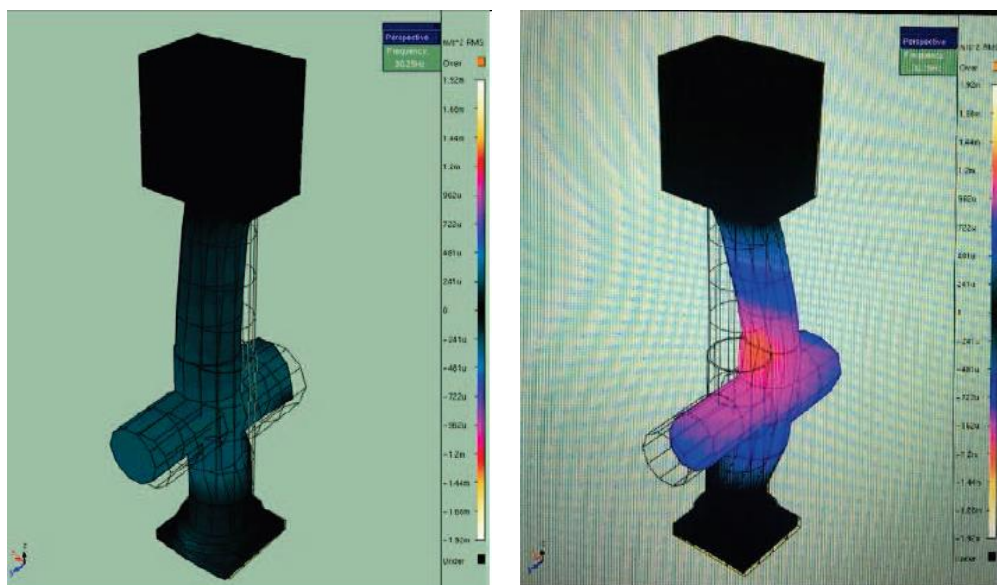


Figura 23. ODS Natural frequency 30.25 Hz

Fuente: Flowserve Corporation, 2019

Verificación de resultado de prueba de impacto y valores de vibración, se confirma que en el sistema existe una resonancia mecánica, sincronizándose la frecuencia fundamental de 1 780 rpm (29,66 Hz) con la frecuencia de 30,25 Hz, no se tiene un margen de separación superior a 15 % recomendado por el fabricante.

4.2. DIAGNÓSTICO

Para garantizar la normal operación de la bomba, se realizan pruebas previas, la primera de ellas es la prueba en vacío, que nos garantiza que la bomba no incurra en resonancia mecánica para no

perjudicar la funcionalidad de la bomba; sin embargo, los resultados obtenidos indican un exceso de vibración.

Por ello, se debe descubrir la causa de la falla, iniciando un análisis de descarte teniendo en cuenta que el proceso de montaje, instalación y puesta en marcha se efectuó con los protocolos establecidos por la norma vigente, garantizando que todo el proceso esté dentro de los rangos de tolerancia permitidos, por ende, se descarta fallas por desbalance, desalineación y fugas.

Teniendo en consideración lo anterior, se inicia con la inspección para vibraciones, en la que se percibe que la estructura presenta resonancia mecánica, pues las fuerzas dinámicas coinciden con las frecuencias naturales de la estructura de soporte motor y la mejor herramienta para determinar la existencia de dicha falla (resonancia en la estructura) es un adecuado análisis de diseño dinámico y de vibraciones estructurales.

Y es a partir de los resultados obtenidos que se propone realizar una modificación en la bomba. Esta innovación implica solo rotar el soporte-motor, con ello se espera separar la velocidad de operación de la frecuencia de 30,25 Hz en un valor del + 10 %. Se debe tener en cuenta que, para realizar esta modificación, el sistema de enfriamiento de la caja de

rodamientos de la bomba deberá ser desconectado, lo que implica drenar la caja de rodamientos. Se realiza la rotación de 90° del soporte-motor.

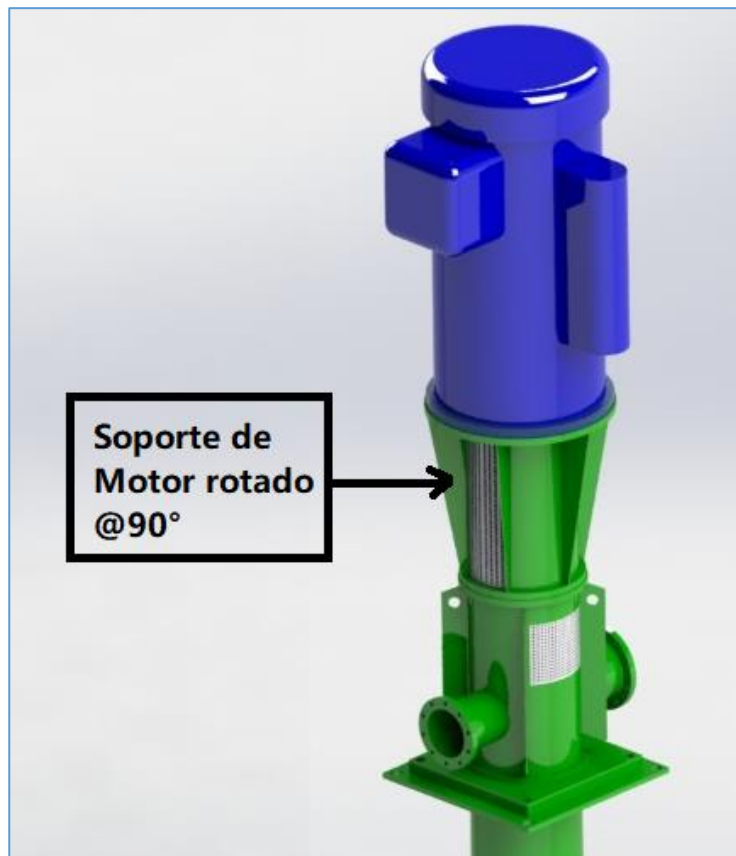


Figura 24. Rotación del soporte motor

Fuente: Elaboración propia

Se realizan nuevas pruebas de vibración operando el equipo en vacío para la recopilación de datos:

Tabla 3

Datos de la prueba de vibración con el soporte de motor girado a 90°

Posición prueba de impacto, soporte motor a 90°	Resultados en Hz
Paralelo a la descarga, brida de motor	32.50
Perpendicular a la descarga, brida de motor	32.50

Fuente: Elaboración propia

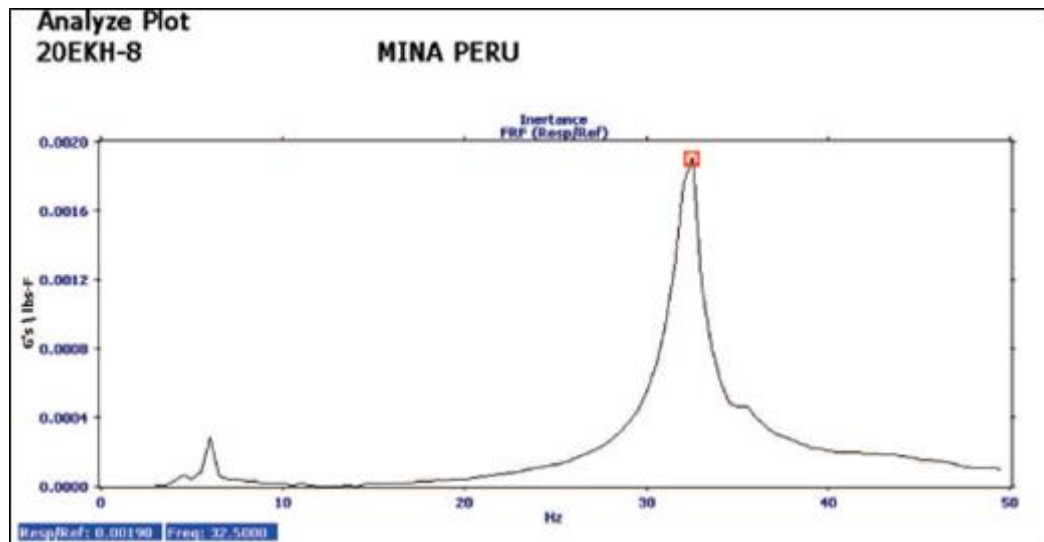


Figura 25. Resultado prueba de impacto paralelo a la descarga, brida motor, soporte motor @ 90°.

Fuente: Elaboración propia con analizador de vibraciones

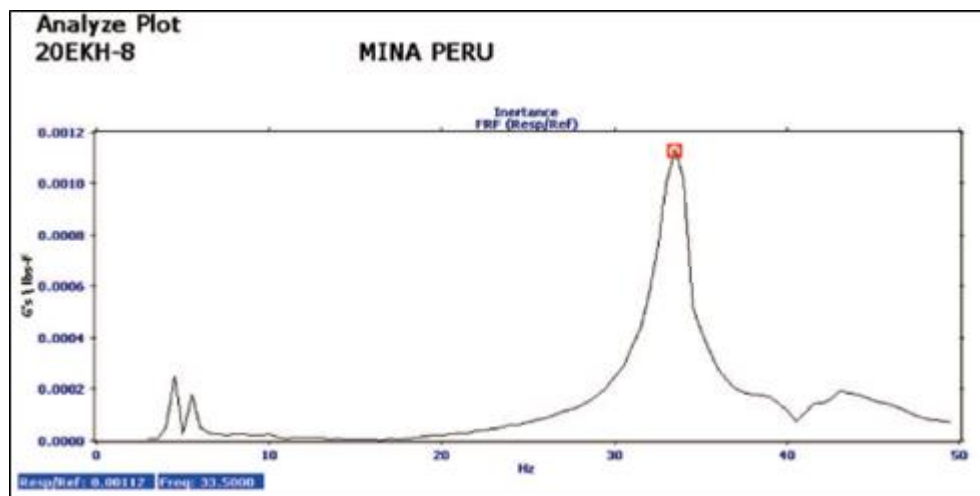


Figura 26. Perpendicular a la descarga, brida de motor, brida de motor, soporte motor @ 90°

Fuente: Elaboración propia con analizador de vibraciones

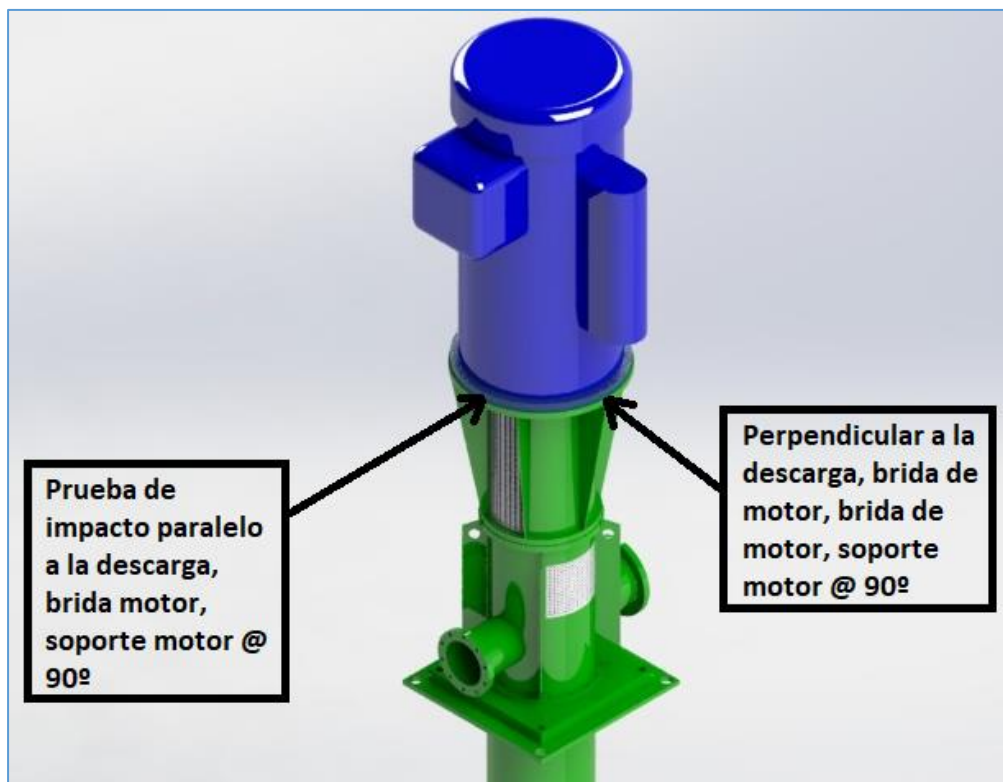


Figura 27. Zonas de pruebas de impacto con soporte rotado a 90°

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4

Toma de valores de vibración del motor eléctrico montado en la bomba a la velocidad de operación de 1780 RPM, con rotación del soporte motor a 90°.

Posición acelerómetro	mm/seg [RMS]
Parte superior motor, paralelo a la descarga	4,55
Parte superior motor, perpendicular a la descarga	2,67
Parte inferior motor, brida, paralelo a la descarga	5,99
Parte inferior motor, brida, perpendicular a la descarga	3,13

Fuente: Elaboración propia, 2019

Se solicita bajar las revoluciones del motor eléctrico con el VFD a 1 680 RPM para evaluar el comportamiento y registrar los valores de vibración.

Tabla 5

Toma de valores de vibración del motor eléctrico con el VFD a 1680 RPM

Posición acelerómetro	mm/seg [RMS]
Parte superior motor, paralelo a la descarga	2,61
Parte superior motor, perpendicular a la descarga	2,17
Parte inferior motor, brida, paralelo a la descarga	2,97
Parte inferior motor, brida, perpendicular a la descarga	1,65

Fuente: Elaboración propia, 2019

Se solicita bajar las revoluciones del motor eléctrico con el VFD a 1600 RPM para evaluar el comportamiento y registrar los valores de vibración.

Tabla 6

Toma de valores de vibración del motor eléctrico con el VFD a 1600 RPM

Posición acelerómetro	mm/seg [RMS]
Parte superior motor, paralelo a la descarga	2,18
Parte superior motor, perpendicular a la descarga	1,61
Parte inferior motor, brida, paralelo a la descarga	1,99
Parte inferior motor, brida, perpendicular a la descarga	1,10

Fuente: Elaboración propia, 2019

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1. RESULTADOS

5.1.1. Verificar la implementación; montaje e instalación de una bomba Barren vertical

El proceso de implementación, montaje e instalación se hizo teniendo como base lo indicado en API RP 686 *Recommended Practice for Machinery Installation and Installation Design*, los lineamientos mencionados en el Manual del fabricante y los procedimientos de trabajo.

5.1.2. Determinación de la causa raíz de la vibración excesiva de la bomba Barren vertical

El estudio dio lugar a la rotación del soporte motor y llevar a cabo pruebas de vibración, se pudo separar la velocidad de operación de frecuencia superior al 9 %, pero inferior al 10 % en línea de descarga.

Y se obtuvo como resultado, la disminución en los valores de vibración en dirección a la descarga y succión de la bomba, denotando mejora en la línea con succión y descarga en un 300 % aproximadamente.

Después de haber reducido gradualmente la velocidad de operación de 1 780 RPM a 1 680 RPM luego 1 600 RPM y realizando el análisis de vibración se evidencia una mejora en los valores de vibración.

Se observa que, operando a la velocidad de 1 600 RPM, los valores de vibración se encuentran dentro de los parámetros indicados por el fabricante para la operación continua del equipo bomba-motor.

Además, se tomó la decisión de hacer una modificación del soporte motor con las siguientes especificaciones:

- a. Modificar el diseño de los “*ribs*” existentes e incrementar el ancho en aproximadamente 5,00 in en la parte superior para proveer mayor rigidez al soporte motor, además de incrementar el espesor de los “*ribs*” a 1, 00 in.
- b. Adicionar 4 “*ribs*” en el soporte motor con las mismas características del punto a. se tendrán 10 “*ribs*” igualmente espaciados.
- c. Rotar 45 grados la posición de las ventanas, de la posición original.
- d. Incrementar el espesor de la envolvente a 0,625 in.

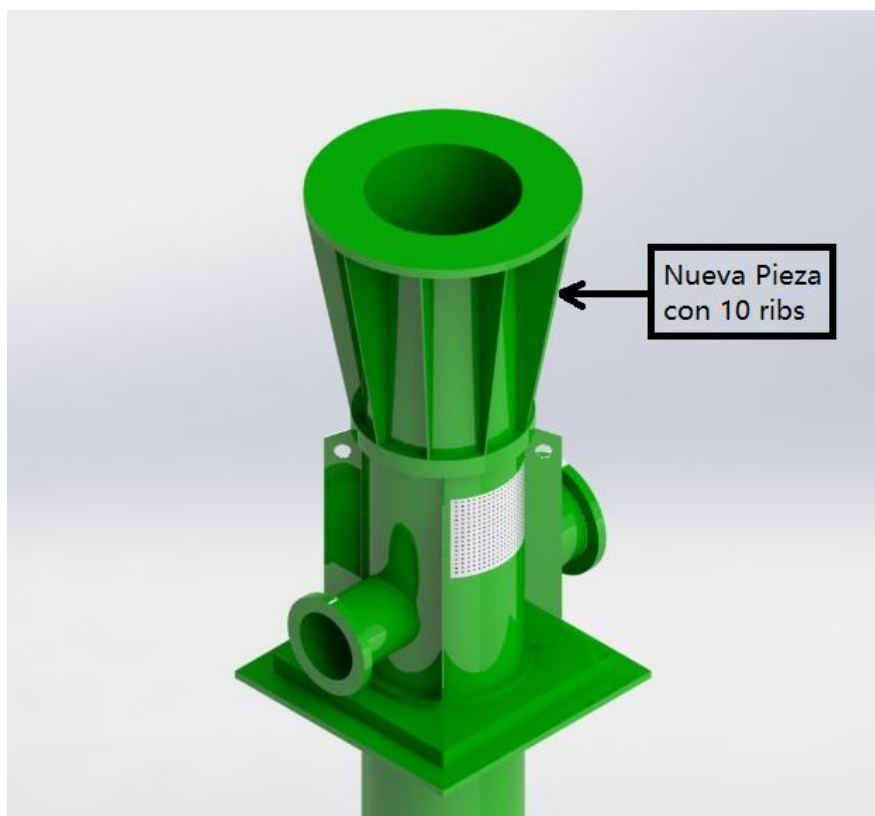


Figura 28. Reemplazo de la nueva pieza soporte-motor

Fuente: Elaboración propia

5.1.3. Establecer la ampliación de la capacidad operativa de la UM Pucamarca

Después de haber corregido el exceso de vibración de la bomba Barren vertical, se realizaron las pruebas de la bomba sin carga y con carga obteniendo los resultados esperados, garantizando la operatividad de la bomba Barren y la viabilidad de ampliar el PAD de lixiviado de la UM Pucamarca.

5.2. DISCUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, se corroboró que la falla es de índole estructural, ocurre un caso distinto con lo que sugiere Barboza Cervan, en su trabajo de Tesis (2013), que, para su realidad, la falla fue provocada por desalineamiento.

Sin embargo, ambos fundamentos se sujetan a la teoría de análisis de vibraciones, que, según Glen White (1990 – 2010), sugiere que las fallas más típicas en una bomba son provocadas por desbalance, desalineamiento o problemas del eje, fallas eléctricas, rodamientos, falla estructural y cavitación.

Por último, teniendo en cuenta la teoría de análisis de vibración todos los resultados deben ser sostenidos por pruebas en los puntos de inspección para vibración que corresponden con la línea central del eje, según lo indica David Trocel, en su Blog Análisis de vibraciones en bombas.

CONCLUSIONES

En esta tesis se determinó la causa raíz de vibración excesiva presente en una bomba Barren vertical instalada en la UM Pucamarca – Minsur, incluyendo la verificación de la implementación, montaje e instalación de la misma, asegurando así, la ampliación de la capacidad operativa de la UM Pucamarca. Pues de las pruebas de impacto, ODS y análisis de vibraciones en diferentes condiciones se descubre que, el problema de resonancia mecánica se encuentra en la zona del soporte motor.

Las modificaciones propuestas para el nuevo soporte motor permitirán que el equipo trabaje en su velocidad nominal.

Por último, de acuerdo con lo que se identificó en sitio, el acople lado motor, se debe tener un arreglo de candado y no meterlo con interferencia. La instalación de este acople se complica si se tiene interferencia y se debe realizar la instalación en posición vertical.

RECOMENDACIONES

Se recomienda tener una separación de la frecuencia natural del sistema en +/- 20 % según lo estipulado por los análisis realizados.

La información del fabricante de motores debe ser revalidada, ya que el valor de "*reed frequency*" no fue el correcto y esto ocasionó que se presentara el problema de resonancia en el sistema.

El fabricante de motores debe validar los resultados del modelo analítico con una prueba de impacto en planta, antes de que los motores salgan de fábrica. Con la información certificada se debe proceder con validación de resultados de elemento finito y verificar que las modificaciones propuestas servirán en sitio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albayay, R. F. (2015). *Evaluación, diagnóstico y solución al problema de vibraciones en el ducto de descarga de las bombas de recuperación de agua industrial de una planta procesadora de relaves*. Universidad Técnica Federico Santa María. Chile. Cap. IV.
- Asto, M. U. (2014). *Sistema de bombeo de circuito de cianuración-lixiviación para obtener una operación eficiente en la compañía de minas Buenaventura*. Universidad Nacional del Centro del Perú. Perú.
- Escobar, N. J. (2018). *Evaluación para la optimización en la recuperación de oro y plata de la planta de Pucamarca, MINSUR*. Universidad Nacional de San Agustín. Perú.
- Fernández, D. P. (2010). *Bombas centrífugas y volumétricas*. Universidad de Cantabria. España. Pedro Fernández Diez. (2010).
- Flowserve Perú. (2015). *Manual de instalación, operación y mantenimiento, Bomba Vertical - VTP*. FLOWSERVE CORPORATION – USA.

Flowserve Perú. (2017). *User instructions vertical turbine pumps, wet pit (VTP), double casing (VPC)*. FLOWSERVE CORPORATION – USA.

Flowserve Perú. (2015). *Proyecto Bomba Vertical Tag N°30-PP-07C*.
Flowserve Perú. 2015.

HATCH (2016). *Sistema de Bombeo de solución pobre (Barren) concreto – Bomba Vertical Planta & Sección*. HATCH. 2016.

Quiliche, C. J. (2019). *Diseño de soporte para evitar deterioro prematuro de rodamientos, sellos mecánicos, poleas y fajas, por excesiva vibración en motor de bomba Warman, en Minera Yanacocha, 2019*.
Universidad César Vallejo. Perú.

Sotomayor, M. J. (2013). *Sistema de detección de fallas para una bomba centrífuga, 2013*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú. Cap. II.

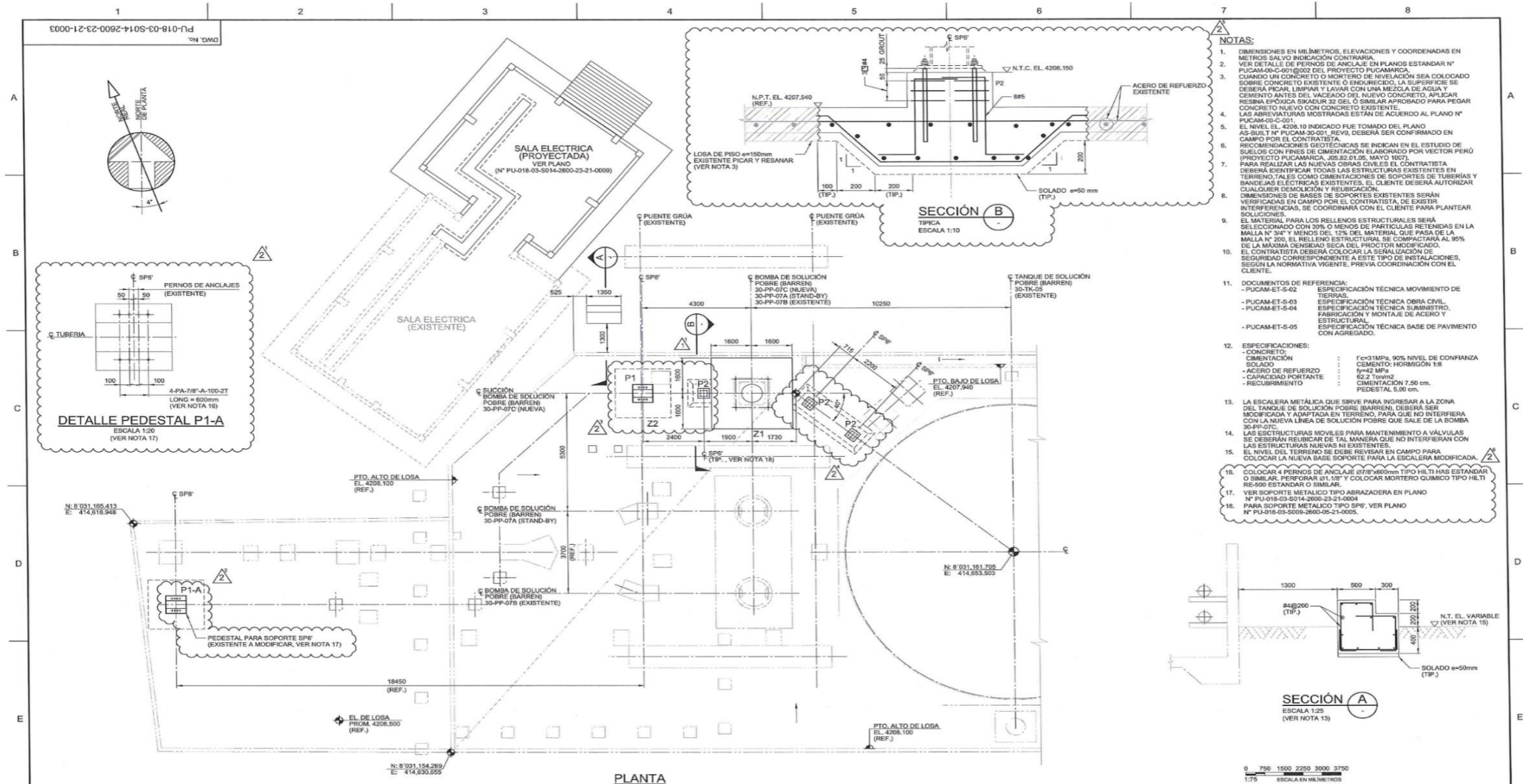
Trocel, F. (2019). *Análisis de Vibraciones en Bombas Centrífugas*. Blog.
David Trocel – 2019.

Viejo, Z. M. (2000). *Bombas: teoría, diseño y aplicaciones*. Mexico. Manuel Viejo Zubicaray.

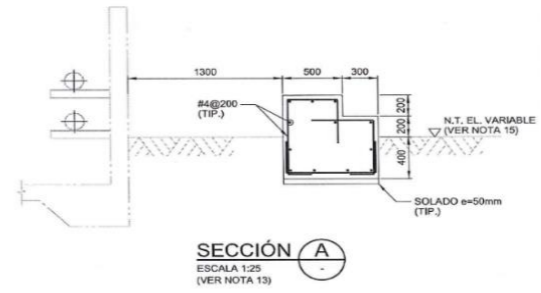
White, G. (2010). *Introducción al análisis de vibraciones*. AZIMA DLI – USA.

ANEXOS

Anexo 1. SISTEMA DE BOMBEO SOLUCIÓN POBRE (BARREN) CONCRETO-BOMBA VERTICAL / PLANTA Y SECCIÓN HATCH (2016)

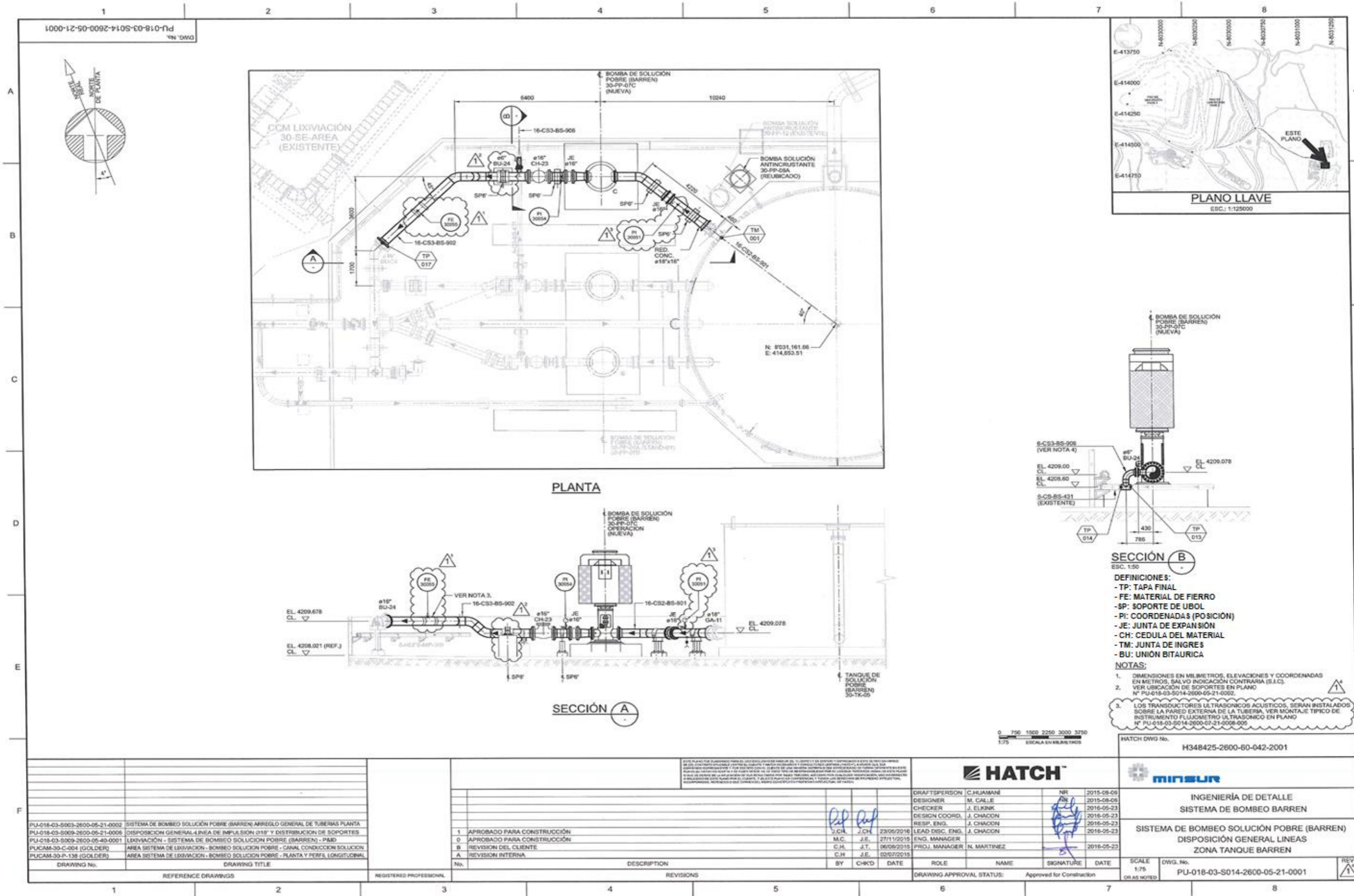


- NOTAS:**
- DIMENSIONES EN MILIMETROS, ELEVACIONES Y COORDENADAS EN METROS SALVO INDICACION CONTRARIA.
 - VER DETALLE DE PERNOS DE ANCLAJE EN PLANOS ESTANDAR N° PUCAM-00-C-001@002 DEL PROYECTO PUCAMARCA.
 - CUANDO UN CONCRETO O MORTERO DE INVELOCACION SEA COLOCADO SOBRE CONCRETO EXISTENTE O ENDURECIDO, LA SUPERFICIE SE DEBERA PICAR, LIMPIAR Y LAVAR CON UNA MEZCLA DE AGUA Y CEMENTO ANTES DEL VACEADO DEL NUEVO CONCRETO, APLICAR RESINA EPOXICA SIKADUR 32 GEL O SIMILAR APROBADO PARA PEGAR CONCRETO NUEVO CON CONCRETO EXISTENTE.
 - LAS ABREVIATURAS MOSTRADAS ESTAN DE ACUERDO AL PLANO N° PUCAM-00-C-001.
 - EL NIVEL EL. 4208.10 INDICADO FUE TOMADO DEL PLANO AS-BUILT N° PUCAM-30-001. DEBE SER CONFIRMADO EN CAMPO POR EL CONTRATISTA.
 - RECOMENDACIONES GEOTECNICAS SE INDICAN EN EL ESTUDIO DE SUELOS CON FINES DE CIMENTACION ELABORADO POR VECTOR PERU (PROYECTO PUCAMARCA, 05.02.01.05, MAYO 1007).
 - PARA REALIZAR LAS NUEVAS OBRAS CIVILES EL CONTRATISTA DEBERA IDENTIFICAR TODAS LAS ESTRUCTURAS EXISTENTES EN TERRENO TALES COMO CIMENTACIONES DE SOPORTES DE TUBERIAS Y BANDEJAS ELECTRICAS EXISTENTES. EL CLIENTE DEBERA AUTORIZAR CUALQUIER DEMOLICION Y REUBICACION.
 - DIMENSIONES DE BASES DE SOPORTES EXISTENTES SERAN VERIFICADAS EN CAMPO POR EL CONTRATISTA. DE EXISTIR INTERFERENCIAS, SE COORDINARA CON EL CLIENTE PARA PLANTEAR SOLUCIONES.
 - EL MATERIAL PARA LOS RELLENOS ESTRUCTURALES SERA SELECCIONADO CON 30% O MENOS DE PARTICULAS RETENIDAS EN LA MALLA N° 30 Y MENOS DEL 12% DEL MATERIAL QUE PASA DE LA MALLA N° 200. EL RELLENO ESTRUCTURAL SE COMPACTARA AL 95% DE LA MAXIMA DENSIDAD SECA DEL PROCTOR MODIFICADO. EL CONTRATISTA DEBERA CUMPLIR LA CANTIDAD DE SEGURIDAD CORRESPONDIENTE A ESTE TIPO DE INSTALACIONES, SEGUN LA NORMATIVA VIGENTE, PREVIA COORDINACION CON EL CLIENTE.
 - DOCUMENTOS DE REFERENCIA:
 - PUCAM-ET-S-02 ESPECIFICACION TECNICA MOVIMIENTO DE TIERRAS
 - PUCAM-ET-S-03 ESPECIFICACION TECNICA OBRA CIVIL
 - PUCAM-ET-S-04 ESPECIFICACION TECNICA SUBSTRITO, FABRICACION Y MONTAJE DE ACERO Y ESTRUCTURAL
 - PUCAM-ET-S-05 ESPECIFICACION TECNICA BASE DE PAVIMENTO CON AGREGADO.
 - ESPECIFICACIONES:
 - CONCRETO: f'c=31MPa, 90% NIVEL DE CONFIANZA
 - CIMENTACION: CEMENTO: HORMIGON 1:8
 - SOLADO: f'c=2 MPa
 - ACERO DE REFUERZO: E2.2 Ton/m2
 - CAPACIDAD PORTANTE: CIMENTACION 7.50 cm.
 - RECUBRIMIENTO: PEDESTAL 5.00 cm.
 - LA ESCALERA METALICA QUE SIRVE PARA INGRESAR A LA ZONA DEL TANQUE DE SOLUCION POBRE (BARREN), DEBERA SER MODIFICADA Y ADAPTADA EN TERRENO, PARA QUE NO INTERFERA CON LA NUEVA LINEA DE SOLUCION POBRE QUE SALE DE LA BOMBA 30-PP-07C.
 - LAS ESTRUCTURAS MOVILES PARA MANTENIMIENTO A VALVULAS SE DEBERAN REUBICAR DE TAL MANERA QUE NO INTERFERAN CON LAS ESTRUCTURAS NUEVAS NI EXISTENTES.
 - EL NIVEL DEL TERRENO SE DEBE REVISAR EN CAMPO PARA COLOCAR LA NUEVA BASE SOPORTE, PARA LA ESCALERA MODIFICADA.
 - COLOCAR 4 PERNOS DE ANCLAJE Ø7/8" (MÍNIMO) TIPO HILTI MAS ESTANDAR O SIMILAR, PERFORAR 1"8" Y COLOCAR MORTERO QUIMICO TIPO HILTI RE-500 ESTANDAR O SIMILAR.
 - VER SOPORTE METALICO TIPO ABRAZADERA EN PLANO N° PU-018-03-S014-2600-23-21-0004
 - PARA SOPORTE METALICO TIPO SPB, VER PLANO N° PU-018-03-S008-2600-05-21-0005.



<p>PU-018-03-S014-2600-06-21-0008 DISPOSICIÓN DE PUESTA A TIERRA - 30-SE-02 Y BOMBA BARREN</p> <p>PU-018-03-S014-2600-06-21-0008 DISPOSICIÓN DE CANALIZACIONES - 30-SE-02 Y PLANTA BARREN</p> <p>PU-018-03-S014-2600-23-21-0004 CONCRETO - BOMBA VERTICAL - SECCIONES & DETALLES</p>		<p>2 MODIFICACIONES DE CIMENTACION Z-2 Y PEDESTALES P-1, P-1A & P-2</p> <p>1 MODIFICACIONES, SEGUN PLANO VENDOR FLOWSERVE N°GPO08860_VG (05.ENE.2016)</p> <p>0 APROBADO PARA CONSTRUCCION</p> <p>B REVISION DEL CLIENTE</p> <p>A REVISION INTERNA</p>		<p>DRAFTSPERSON A. VILCA NR 2015-07-16</p> <p>DESIGNER A. VILCA NR 2015-07-16</p> <p>CHECKER N. MARTINEZ 2015-05-23</p> <p>DESIGN COORD. J. CHACON 2015-05-23</p> <p>RESP. ENG. N. MARTINEZ 2015-05-23</p> <p>LEAD DISC. ENG. N. MARTINEZ 2015-05-23</p> <p>PROJ. MANAGER N. MARTINEZ 2015-05-23</p>		<p>HATCH</p> <p>minsur</p> <p>INGENIERIA DE DETALLE</p> <p>SISTEMA DE BOMBEO BARREN</p> <p>SISTEMA DE BOMBEO SOLUCIÓN POBRE (BARREN)</p> <p>CONCRETO - BOMBA VERTICAL</p> <p>PLANTA & SECCION</p>	
<p>DRAWING No. PU-018-03-S014-2600-23-21-0004</p> <p>DRAWING TITLE CONCRETO - BOMBA VERTICAL - SECCIONES & DETALLES</p>		<p>REGISTERED PROFESSIONAL</p>		<p>DRAWING APPROVAL STATUS: Approved for Construction</p>		<p>SCALE 1:75</p> <p>DWG. No. PU-018-03-S014-2600-23-21-0004</p>	

Anexo 3: SISTEMA DE BOMBEO SOLUCIÓN POBRE (BARREN), DISPOSICIÓN GENERAL DE LINEA ZONA TANQUE BARREN HATCH (2016).

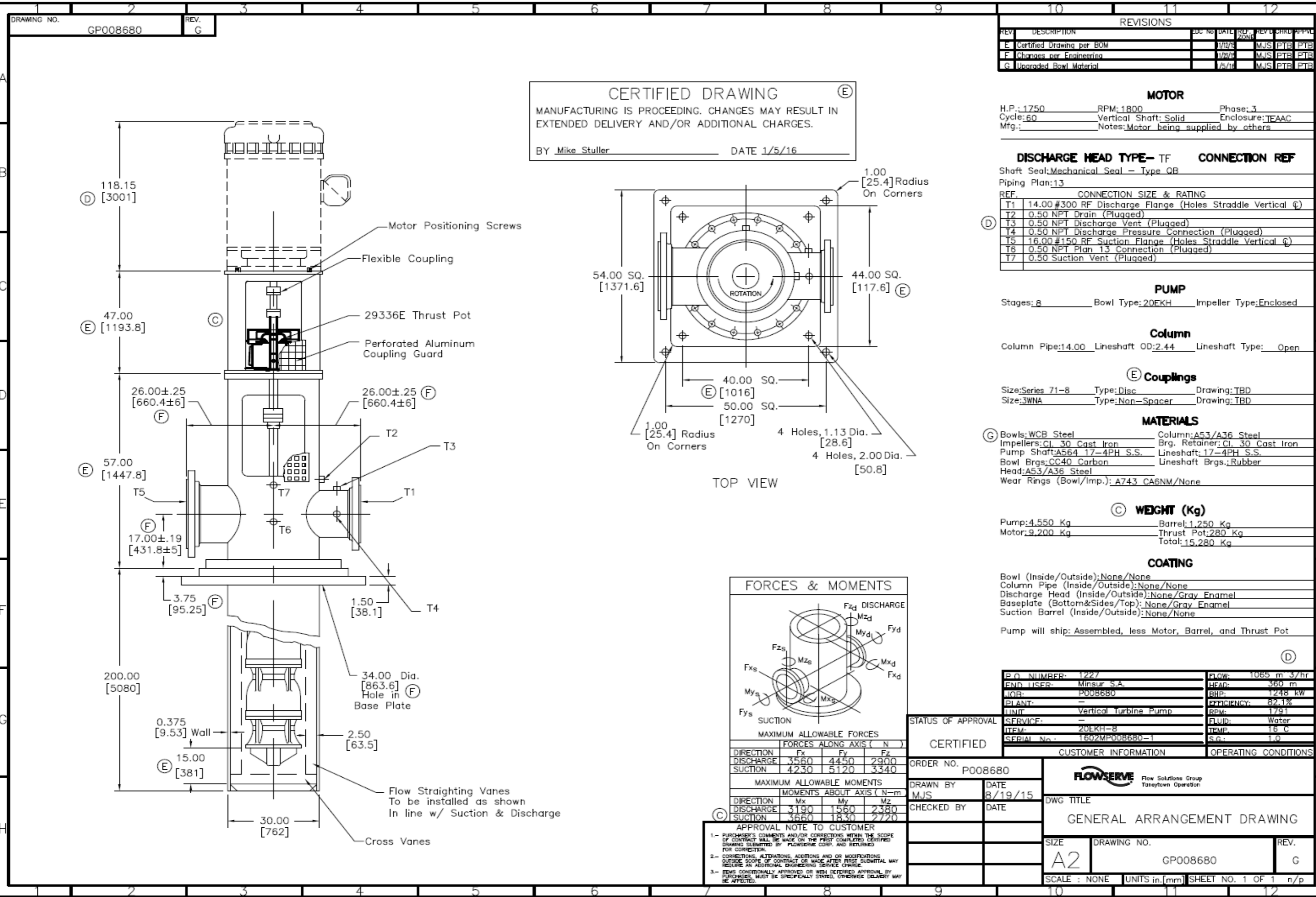


DRAWING No.	DRAWING TITLE
PU-018-03-5003-2600-05-21-0002	SISTEMA DE BOMBEO SOLUCIÓN POBRE (BARREN) ARREGLO GENERAL DE TUBERIAS PLANTA
PU-018-03-5009-2600-05-21-0006	DISPOSICIÓN GENERAL LINEA DE IMPULSION Ø16" Y DISTRIBUCION DE SOPORTES
PU-018-03-5009-2600-05-21-0001	LIXIVIACION - SISTEMA DE BOMBEO SOLUCIÓN POBRE (BARREN) - P.M.D
PUCAM-30-C-004 (GOLDER)	AREA SISTEMA DE LIXIVIACION - BOMBEO SOLUCIÓN POBRE - CANAL CONDUCCION SOLUCION
PUCAM-30-P-138 (GOLDER)	AREA SISTEMA DE LIXIVIACION - BOMBEO SOLUCIÓN POBRE - PLANTA Y PERFIL LONGITUDINAL

No.	DESCRIPTION	BY	CHK'D	DATE
1	APROBADO PARA CONSTRUCCIÓN	J.C.H.	J.C.H.	23/05/2016
0	APROBADO PARA CONSTRUCCIÓN	M.C.	J.E.	27/11/2015
B	REVISION DEL CLIENTE	C.H.	J.T.	06/08/2015
A	REVISION INTERNA	C.H.	J.E.	02/07/2015

ROLE	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAFTSPERSON	C. JIJAMANI		2015-08-09
DESIGNER	M. CALLE		2015-08-09
CHECKER	J. ELKINK		2015-05-23
DESIGN COORD.	J. CHACON		2015-05-23
RESP. ENG.	J. CHACON		2015-05-23
LEAD DISC. ENG.	J. CHACON		2015-05-23
ENG. MANAGER	J. CHACON		2015-05-23
PROJ. MANAGER	N. MARTINEZ		2015-05-23

HATCH DWG No.	H348425-2600-80-042-2001
MINSUR	
INGENIERÍA DE DETALLE SISTEMA DE BOMBEO BARREN	
SISTEMA DE BOMBEO SOLUCIÓN POBRE (BARREN) DISPOSICIÓN GENERAL LINEAS ZONA TANQUE BARREN	
SCALE	DWG. No.
1:75 OR AS NOTED	PU-018-03-S014-2600-05-21-0001



CERTIFIED DRAWING (E)
 MANUFACTURING IS PROCEEDING. CHANGES MAY RESULT IN EXTENDED DELIVERY AND/OR ADDITIONAL CHARGES.
 BY Mike Stuller DATE 1/5/16

REVISIONS						
REV	DESCRIPTION	EDC NO	DATE	REV. DATE	CHKD	APPR
E	Certified Drawing per BOM		1/2/16		MJS	PTR
F	Changes per Engineering		1/2/16		MJS	PTR
G	Upgraded Bowl Material		1/1/16		MJS	PTR

MOTOR
 H.P.: 1750 RPM: 1800 Phase: 3
 Cycle: 60 Vertical Shaft: Solid Enclosure: TEAC
 Mfg.: Notes: Motor being supplied by others

DISCHARGE HEAD TYPE-- TF CONNECTION REF

Shaft Seal: Mechanical Seal - Type QB
 Piping Plan: 13

REF.	CONNECTION SIZE & RATING
T1	14.00 #300 RF Discharge Flange (Holes Straddle Vertical @)
T2	0.50 NPT Drain (Plugged)
T3	0.50 NPT Discharge Vent (Plugged)
T4	0.50 NPT Discharge Pressure Connection (Plugged)
T5	16.00 #150 RF Suction Flange (Holes Straddle Vertical @)
T6	0.50 NPT Plan 13 Connection (Plugged)
T7	0.50 Suction Vent (Plugged)

PUMP
 Stages: 8 Bowl Type: 20EKH Impeller Type: Enclosed

Column
 Column Pipe: 14.00 Lineshaft OD: 2.44 Lineshaft Type: Open

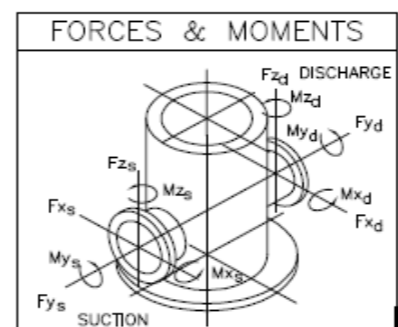
(E) Couplings
 Size: Series 71-8 Type: Disc Drawing: TBD
 Size: 3WNA Type: Non-Spacer Drawing: TBD

MATERIALS
 (G) Bowls: WCB Steel Column: A53/A36 Steel
 Impellers: CI 30 Cast Iron Brg. Retainer: CI 30 Cast Iron
 Pump Shaft: A564 17-4PH S.S. Lineshaft: 17-4PH S.S.
 Bowl Brgs: CC40 Carbon Lineshaft Brgs.: Rubber
 Head: A53/A36 Steel
 Wear Rings (Bowl/Imp.): A743 CA6NM/None

(C) WEIGHT (Kg)
 Pump: 4,550 Kg Barrel: 1,250 Kg
 Motor: 9,200 Kg Thrust Pot: 280 Kg
 Total: 15,280 Kg

COATING
 Bowl (Inside/Outside): None/None
 Column Pipe (Inside/Outside): None/None
 Discharge Head (Inside/Outside): None/Gray Enamel
 Baseplate (Bottom&Sides/Top): None/Gray Enamel
 Suction Barrel (Inside/Outside): None/None
 Pump will ship: Assembled, less Motor, Barrel, and Thrust Pot

PO NUMBER: 1227	FLOW: 1065 m ³ /hr
END USER: Minsur S.A.	HEAD: 360 m
QOR: P008680	BHP: 1246 kw
PLANT: -	EFFICIENCY: 82.1%
UNIT: Vertical Turbine Pump	RPM: 1791
SERVICE: -	FLUID: Water
ITEM: 20EKH-8	TEMP: 16 C
SERIAL No: 1602MP008680-1	S.G.: 1.0



MAXIMUM ALLOWABLE FORCES			
	FORCES ALONG AXIS (N)		
DIRECTION	Fx	Fy	Fz
DISCHARGE	3560	4450	2900
SUCTION	4230	5120	3340

MAXIMUM ALLOWABLE MOMENTS			
	MOMENTS ABOUT AXIS (N-m)		
DIRECTION	Mx	My	Mz
DISCHARGE	3190	1560	2380
SUCTION	3660	1830	2720

APPROVAL NOTE TO CUSTOMER
 1- PURCHASER'S COMMENTS AND/OR CORRECTIONS WITHIN THE SCOPE OF CONTRACT WILL BE MADE ON THE FIRST COMPLETED CERTIFIED DRAWING SUBMITTED BY FLOWSERVE CORP. AND RETURNED FOR CORRECTION.
 2- CORRECTIONS, ALTERATIONS, ADDITIONS AND/OR MODIFICATIONS OUTSIDE SCOPE OF CONTRACT OR MADE AFTER FIRST SUBMITTAL MAY REQUIRE AN ADDITIONAL ENGINEERING SERVICE CHARGE.
 3- ITEMS CONDITIONALLY APPROVED OR WITH DEFERRED APPROVAL BY PURCHASER MUST BE SPECIFICALLY STATED, OTHERWISE DELIVERY MAY BE AFFECTED.

STATUS OF APPROVAL
CERTIFIED

ORDER NO. P008680
 DRAWN BY MJS DATE 8/19/15
 CHECKED BY DATE

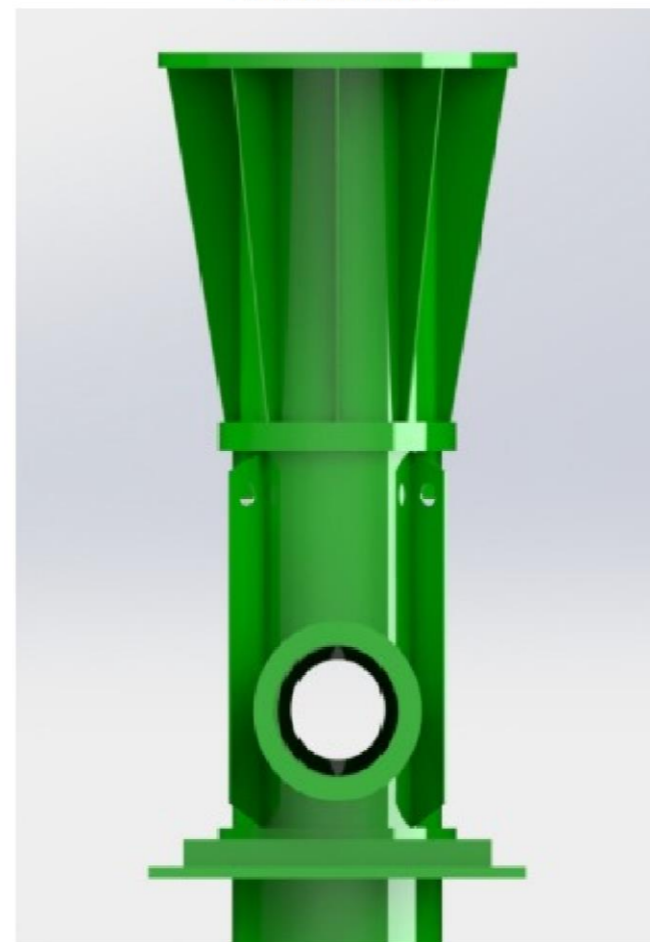
FLOWSERVE Flow Solutions Group
 Toneytown Operation

DWG TITLE
GENERAL ARRANGEMENT DRAWING

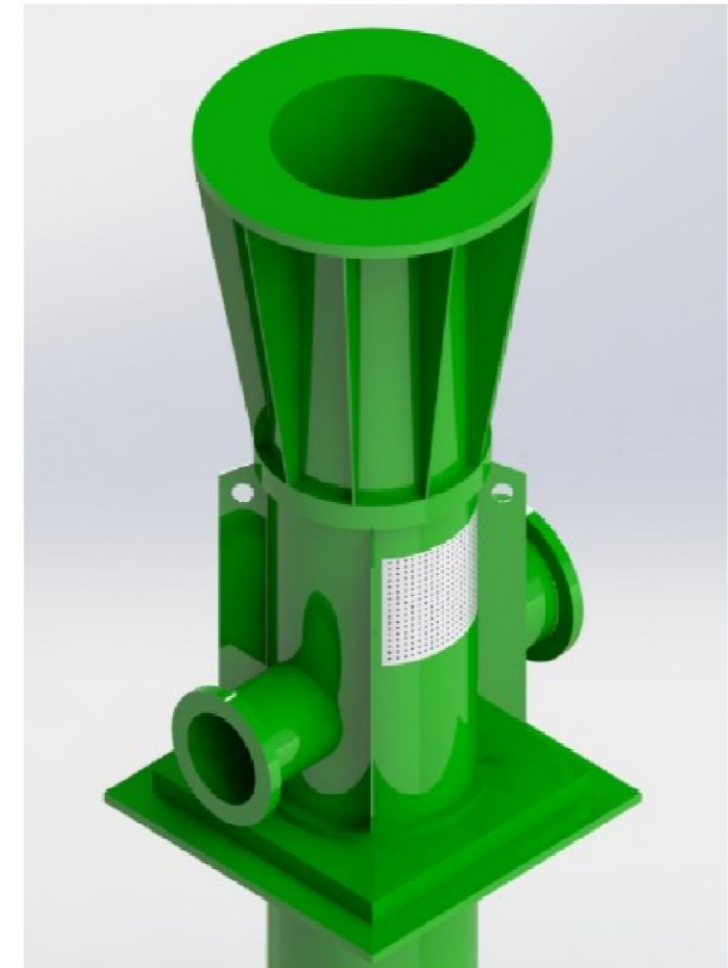
SIZE **A2** DRAWING NO. **GP008680** REV. **G**
 SCALE : NONE UNITS in./mm SHEET NO. 1 OF 1 n/p



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL



MODELADO 3D

DIBUJADO POR:		FECHA:		TITULO:			
ABEL QUIRITA YANA		11-11-2021					