



**Caracterización y estandarización de los sistemas de bombeo en minería
subterránea**

Cesar Augusto Cardona Pineda

Informe de práctica para optar al título de Ingeniero Mecánico

Asesores

Paula Andrea Pineda Escobar, Ingeniera Mecánica

Edward Oswaldo Leal Martínez, Ingeniero de Minas

Laura Isabel Velásquez García, Ingeniera Mecánica

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica
Medellín, Antioquia, Colombia

2021

Cita	Cardona Pineda [1]
Referencia Estilo IEEE (2020)	C.A Cardona Pineda, “Caracterización y estandarización de los sistemas de bombeo de las principales minas de la compañía Gran Colombia Gold con operaciones en el municipio de Segovia (Antioquia)”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Mecánica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2021.



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Pedro León Simanca.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mi familia, amigos que me acompañaron en este proceso.

Agradecimientos

A la Universidad de Antioquia, profesores, compañeros de trabajo y estudio por los momentos y enseñanzas en mi formación como Ingeniero Mecánico.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	8
ABSTRACT	9
I. INTRODUCCIÓN.....	10
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
III. OBJETIVOS	14
IV. MARCO TEÓRICO	15
Principios Generales	15
Demandas del proceso.	16
Tipos de bombas.	17
Clasificación de bombas.	18
Bombas Centrifugas.....	19
Características.....	21
Principios fundamentales de la hidráulica.	22
Flujo de fluido.....	22
Cabeza.....	22
Cabeza estática.	23
Cabeza de velocidad.....	23
Cabeza por fricción.	24
Fricción en las tuberías.....	24
Fricción en los accesorios de las tuberías.....	25
Desempeño de la bomba.....	27
Principios Generales.	27
Curvas de la bomba.	27

Leyes de afinidad.....	28
Punto de funcionamiento de la bomba.	29
Bombas conectadas en paralelo.....	30
Bombas conectadas en serie.	31
Cavitación.....	31
V. METODOLOGÍA	33
Reconocimiento de la compañía.	33
Recopilación de la información.	33
Inventario de los equipos.	33
Medición de parámetros de bombeo.....	33
Levantamiento de Planos y memorias descriptivas del servicio de bombeo.....	33
Cronograma de mantenimiento de tanques y sedimentadores.....	33
Reuniones y recorridos de mina.	34
Identificación de fallas y mejoras en el sistema de bombeo.....	34
VI.RESULTADOS	35
VII. CONCLUSIONES	48
REFERENCIAS	49
ANEXOS	50

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1:Municipio de Segovia _____	10
Ilustración 2:Municipio de Remedios _____	11
Ilustración 3:Equipos usados con motores eléctricos. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. (2018, octubre). Manual de optimización de sistemas de bombeo.[1] _____	15
Ilustración 4:Componentes del Sistema de Bombeo. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. (2018, octubre). Manual de optimización de sistemas de bombeo. _____	16
Ilustración 5: Tipos de bombas que se usan en la industria. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. (2018, octubre). Manual de optimización de sistemas de bombeo.[1] _____	17
Ilustración 6:Tipos de bombas. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. (2018, octubre). Manual de optimización de sistemas de bombeo. _____	18
Ilustración 7: Bombas de succión axial. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. (2018, octubre). Manual de optimización de sistemas de bombeo.[1] _____	19
Ilustración 8: Bomba montada en bastidor y de acoplamiento directo. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. (2018, octubre). Manual de optimización de sistemas de bombeo.[1] _____	19
Ilustración 9: Direcciones del flujo de las bombas centrífugas (radiales, mixtas y axiales). Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. (2018, octubre). Manual de optimización de sistemas de bombeo.[1] _____	20
Ilustración 10: Bombas multietapas verticales y horizontales. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. (2018, octubre). Manual de optimización de sistemas de bombeo. _____	20
Ilustración 11Tipos de impulsores. Robert L., M. (2015). Mecánica De Fluidos - 7a Edición (7.a ed.). Pearson Educación.[2] _____	21

Ilustración 12:Curva de desempeño de una bomba. Robert L., M. (2015). Mecánica De Fluidos - 7a Edición (7.a ed.). Pearson Educación.[2]	28
Ilustración 13: Punto de Operación de la bomba. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. (2018, octubre). Manual de optimización de sistemas de bombeo[1].	30
Ilustración 14: Simulación software Pumpsim Proyecto mina Sandra K[4]	36
Ilustración 15: Balance de caudales sistema actual mina Sandra K	37
Ilustración 16: Horas de operación día equipos de bombeo mina El Silencio	38
Ilustración 17: Balance total galones por día mina El Silencio	40
Ilustración 18:Unifilar mina El Silencio Actual	41
Ilustración 19: Unifilar mina Sandra K Actual	42
Ilustración 20:Tipos de bombas. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. (2018, octubre). Manual de optimización de sistemas de bombeo.	
Ilustración 21: Unifilar actual mina Sandra K Actual	42
Ilustración 22 :Unifilar mina Providencia Actual	43
Ilustración 23:Unifilar mina Carla Actual	44
Ilustración 24:Unifilar mina Providencia Proyectado	45
Ilustración 25:Unifilar mina Sandra K Proyectado	46
Ilustración 28:Vista en planta y caracterización de equipos Sala compresores min Providencia	50
Ilustración 29 :Detalle tubería aire comprimido Sala de compresores mina Providencia	51
Ilustración 30:Detalle tubería aire comprimido Sala de compresores mina Providencia	52
Ilustración 31:Levantamiento de detalle Sala compresores mina El Silencio	53
Ilustración 32:Detalle tubería sala de compresores mina El Silencio	54

RESUMEN

Los sistemas de bombeo están presentes en la industria minera subterránea cuando el agua de mina, producto de las excavaciones, debe ser bombeada hacia superficie para garantizar la continuidad de la producción. La selección de estos sistemas de bombeo precisa del correcto establecimiento del equilibrio hidráulico del sistema. Los Ingenieros Mecánicos, hacen uso de las ecuaciones de conservación de la masa, energía y cantidad de movimiento para esta actividad. Errores al establecer el equilibrio hidráulico ocasionan graves consecuencias en la estación de bombeo. Es decir, al sobredimensionar un sistema se tendrían equipos más potentes trabajando a menores eficiencias ocasionando pérdidas económicas y técnicas; en el caso contrario se tendrían sistemas sin capacidad suficiente para evacuar el agua requerida.

En las operaciones mineras se desarrollan en paralelo muchas actividades tanto operativas como de planeamiento, exploración, sostenimiento, topografía, mantenimiento (eléctrico, diésel, mecanizado), explotación, transporte, etc. Todas estas labores mineras se desarrollan demandando una serie de servicios, los servicios auxiliares mina, que se encargan de surtir, agua, aire comprimido, ventilación y bombeo de aguas freáticas y de infiltraciones. Es por esto que se le apuesta a un proceso de reingeniería, renovación de estaciones, equipos y estandarización.

Inicialmente sería la caracterización de los equipos y rutas de líneas hidráulicas e implementar sistemas de medición tanto de caudales, presiones, capacidades de tanques todo esto como parte de la estrategia que apunta hacia la automatización del sistema de bombeo haciendo así más segura la operación.

Palabras Clave – Bombeo, minería, agua, sistemas de medición

ABSTRACT

Pumping systems are present in the subway mining industry when mine water, produced by excavations, must be pumped to the surface to ensure the continuity of production. The selection of these pumping systems requires the correct establishment of the hydraulic balance of the system. Mechanical engineers make use of the equations of conservation of mass, energy and quantity of movement for this activity. Errors in establishing the hydraulic balance cause serious consequences in the pumping station. That is to say, oversizing a system would result in more powerful equipment working at lower efficiencies causing economic and technical losses; in the opposite case, there would be systems with insufficient capacity to evacuate the required water.

In mining operations, many activities are carried out in parallel, both operational and planning, exploration, support, topography, maintenance (electrical, diesel, mechanized), exploitation, transportation, etc. All these mining tasks require a series of services, the mine auxiliary services, which are in charge of supplying water, compressed air, ventilation and pumping of phreatic and infiltration waters. This is why we are committed to a process of reengineering, renewal of stations, equipment and standardization.

Initially, it would be the characterization of the equipment and routes of hydraulic lines and the implementation of measurement systems for flow rates, pressures and tank capacities, all of this as part of the strategy aimed at automating the pumping system, thus making the operation safer.

***Keywords* — Pumping, mining, water, measurement systems.**

I. INTRODUCCIÓN

Gran Colombia Gold es una compañía canadiense, líder en la exploración y producción de oro y plata, con operaciones enfocadas en Colombia. Desde diciembre de 2010 cotiza en la Bolsa de Valores de Toronto (Canadá), lo cual ha permitido financiar los proyectos mineros que, en la actualidad, ubican a la compañía como el productor subterráneo de oro y plata más importante del país, con los títulos mineros sobre los más grandes recursos estimados en Colombia de estos metales preciosos.

La compañía está comprometida en gestionar un modelo de negocio al mismo tiempo que enfrenta el reto de la sostenibilidad: equilibrar el crecimiento económico, el desarrollo social y la protección ambiental, de forma que el bienestar de las generaciones futuras no se vea afectado por las acciones que se realizan hoy.

Gran Colombia Gold opera en 4 municipios de Colombia, La operación en Segovia y Remedios se encuentra ubicada en el nordeste del departamento de Antioquia, en un área aproximada de 9.000 hectáreas. Cuenta con cuatro minas subterráneas: El Silencio, Providencia, Sandra K y Carla. Las cuales han estado activas por más de 150 años; en este lapso han producido un estimado de 5 millones de onzas de oro. Gran Colombia Gold desarrolla su operación de vetas en el sistema de perforación electrohidráulica, auxiliado por minado selectivo y altamente cíclico. Este sistema seguro permite la disponibilidad del mineral durante las 24 horas, los siete días de la semana.

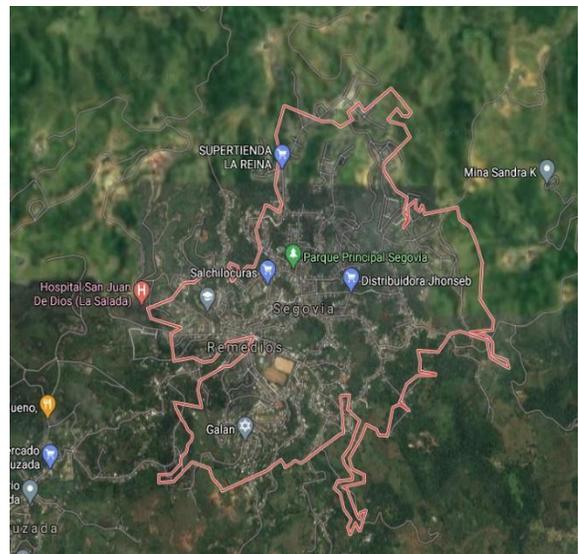


Ilustración 1: Municipio de Segovia

Desde el año 2010 Gran Colombia Gold lleva a cabo un extenso programa de exploración y perforación alrededor de las minas existentes para identificar nuevos recursos y poder ampliar el área de explotación. Comenzó a explorar nuevas áreas de su título para lograr tal fin.

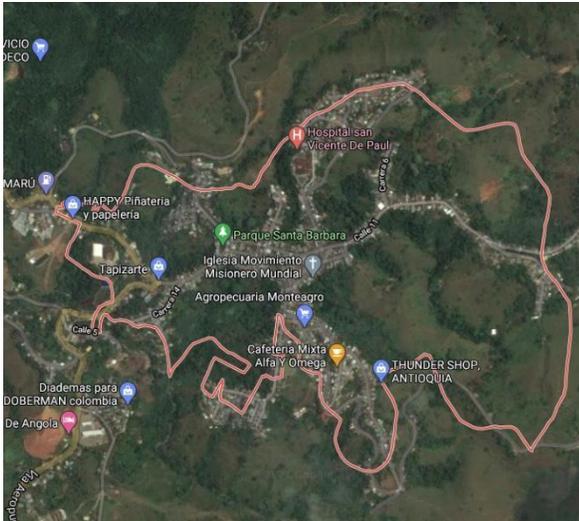


Ilustración 2: Municipio de Remedios

Los municipios de Segovia y Remedios se ubican en la subregión nordeste del departamento de Antioquia en Colombia.

Segovia se encuentra a una altitud media de 650 msnm fue fundada en 1869 y su población es de 37.900 habitantes, en su mayoría pertenecientes al área urbana.

Remedios se ubica en 700 msnm, fue fundada en 1560, tiene un total de 28,400 habitantes, y su economía se basa en la minería de oro y plata, además de la agricultura, la ganadería y la explotación de madera.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El municipio de Segovia cuenta con una inmensa riqueza de metales preciosos , es por esto que la compañía ha invertido un inmenso capital tanto en los procesos de producción como en la exploración de nuevos yacimientos , es por ello que la compañía actualmente es el mayor productor de oro en minería subterránea en el país ,produciendo en promedio aproximado de 18.000 onzas de oro mensuales , se busca un proceso de alta tecnología con equipos mecanizados que optimicen la producción sin dejar de lado la responsabilidad ambiental para mitigar el impacto en el medio ambiente .

Como se ha descrito anteriormente la compañía adquirió títulos mineros los cuales ya se venían explotando tiempo atrás, pero de una manera artesanal, y otros títulos mineros que apenas se vienen desarrollando, como es el caso de mina Carla la cual es la más joven de las cuatro principales minas en la cuales se desarrolla la práctica académica.

Desde el área de Planeación se toman las decisiones de ingeniería en cuanto a proyectos y futuros desarrollos que se van a ejecutar en operaciones mineras, hacen parte de esta los servicios auxiliares que se encarga de surtir los servicios de agua potable, ventilación, aire comprimido y extracción de aguas subterráneas (bombeo) para llevar a cabo las operaciones en los frentes de trabajo buscando un uso racional de la energía y aprovechamiento de los recursos.

Los sistemas de bombeo, conformado por equipos, líneas de tuberías, tanques, accesorios de tuberías, que se necesitan para un correcto funcionamiento deben ser evaluados por un equipo interdisciplinario de diferentes áreas como son mantenimiento mecánico, mantenimiento eléctrico, confiabilidad, ambiental y el área de operaciones, es por esto que cabe resaltar una buena comunicación y trabajo en equipo para tener un buen funcionamiento.

Las condiciones geográficas de las minas en el municipio de Segovia y la profundidad de estas aumentan la probabilidad de encontrar grandes volúmenes de aguas subterráneas lo que hace que se inunden los frentes de trabajo y las vías de extracción del mineral, lo que se busca es captar estas aguas y llevarlas a superficie cumpliendo con los estándares de calidad para su vertimiento en los afluentes.

Es reciente la idea de la compañía de aplicar ingeniera en estos sistemas de bombeo, dado que aproximadamente se consume entre un 15 y un 25 % del costo energético que consume la compañía en su operación y es de suma importancia para la seguridad de los trabajadores y su explotación ya que en las labores inundadas no pueden entrar los equipos, ni tampoco el personal.

Se deben listar los equipos, definir rutas, ubicaciones de estaciones , capacidades de tanques, caudales de infiltraciones , equipos críticos ,curvas de operación de las bombas, medir consumos, presiones , medir y estimar caudales ya que se comienza con la instalación de micromedidores y manómetros como un proyecto a mediano plazo con miras en la automatización, dado al tamaño de las minas y al cantidad de estaciones que se ,también se trabaja en el manejo del agua con sedimentadores , mantenimiento de tanques y lodos que afectan los equipos de bombeo .

También el apoyo en formulación de nuevos proyectos que se necesitan dado la antigüedad de algunas estaciones y tanques, equipos y el constante desarrollo de las minas y su profundización, proyectando futuras zonas que se puedan presentar cantidades considerables de aguas freáticas.

III. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Caracterizar los sistemas hidráulicos de las 4 minas principales de la compañía

B. Objetivos específicos

- Recopilar información de la compañía para listar todos los equipos de bombeo existentes: tiempo de uso, potencia y consumos.
- Identificar fallas y oportunidades de mejora en los sistemas de bombeo y en cuanto a diseño, tanques y tuberías.
- Apoyar las actividades del área de planeación en los diferentes proyectos.

IV. MARCO TEÓRICO

Principios generales

La Comisión europea realizó unos estudios que comprobaron que los sistemas de bombeo representan aproximadamente el 22 % de la demanda energética de los motores eléctricos de todo el mundo como se observa en la figura

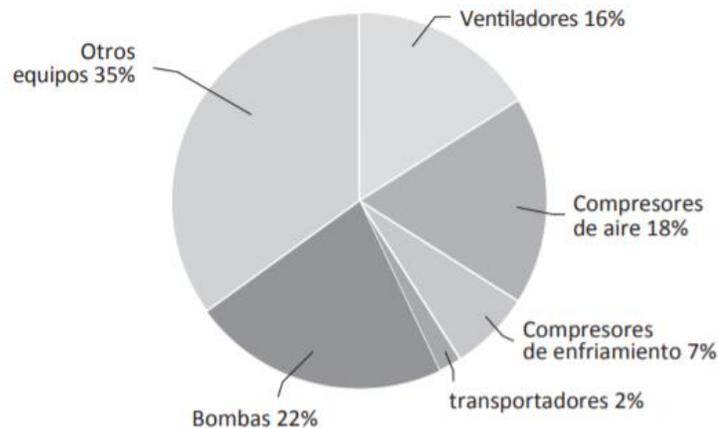


Ilustración 3: Equipos usados con motores eléctricos. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. (2018, octubre). Manual de optimización de sistemas de bombeo.[1]

Debido a la gran cantidad de energía que consumen las bombas, los sistemas de bombeo son un excelente candidato para generar ahorros energéticos. De la energía que se usa para bombear, aproximadamente el 75 % corresponde a bombas centrífugas y el 25 % restante a bombas de desplazamiento positivo.

A lo largo de los años, las bombas han ido mejorando su desempeño gracias a un diseño optimizado y al uso de mejores técnicas de fabricación. No obstante, la eficiencia de las bombas centrífugas sigue dependiendo en gran medida del lugar de la curva en que se opera.

Hay cuatro causas habituales por las que el desempeño de los sistemas de bombeo no está optimizado:

- Los componentes montados son ineficientes para las condiciones operativas habituales.
- La eficiencia de los componentes del sistema de bombeo se degrada.
- Se opera con más caudal o más cabeza que los que necesita el sistema.

- Se opera la bomba en momentos que el sistema no lo necesita.

Todos los componentes de un sistema de bombeo están conectados entre sí e interactúan con la bomba. Esto incluye a componentes como los dispositivos de accionamiento y control de la bomba, las tuberías y todos los otros componentes por los que pasa el fluido.

Es importante entender la interdependencia que existe entre los distintos componentes de un sistema de bombeo. Esto quiere decir que cualquier cambio en un componente va a impactar sobre los otros componentes del sistema, por lo que no se los puede tratar individualmente. En los sistemas complejos, es necesario contar con un gráfico del sistema que contenga todas las partes del mismo.

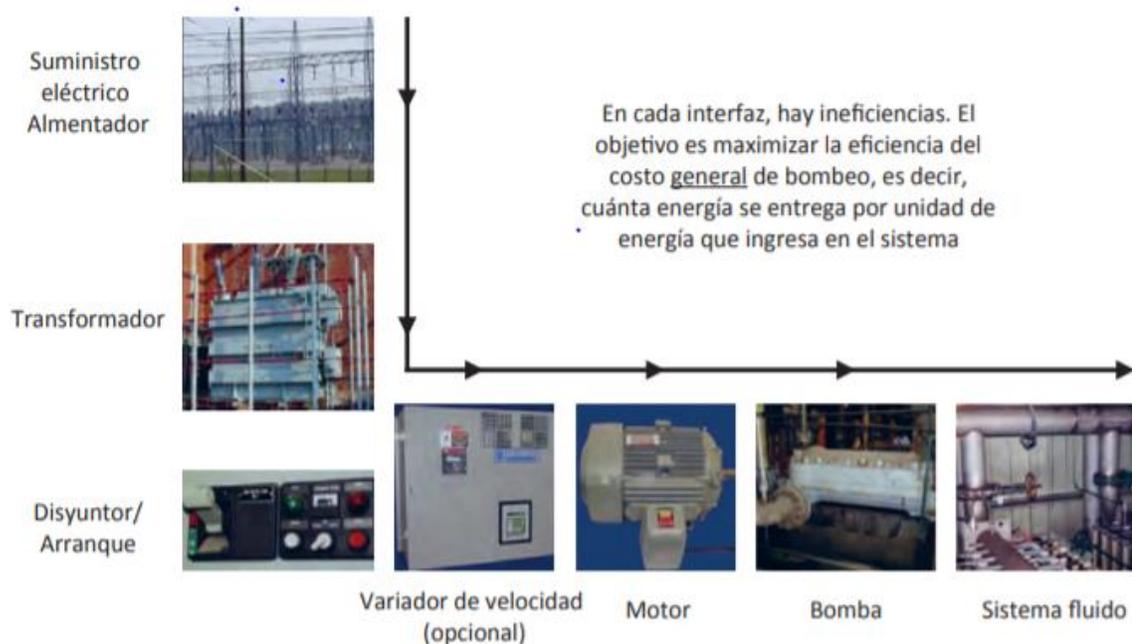


Ilustración 4: Componentes del Sistema de Bombeo. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. (2018, octubre). Manual de optimización de sistemas de bombeo.

Demandas del proceso.

Cuando se optimizan sistemas de fluidos, es esencial entender cómo varían los requisitos del caudal a lo largo del tiempo. Es muy común que los sistemas de bombeo se sobren diseñen, es decir, que sean capaces de entregar más caudal o cabeza que los que el proceso necesita. Las razones por las que esto pasa son varias, pero por lo general, los sistemas se diseñan para «necesidades futuras», es decir, pensando que las necesidades del

sistema van a aumentar, o bien se diseñan para requisitos más grandes «por si acaso». Los sistemas con bombas sobre diseñadas tienen pérdidas excesivas y consumen mucha electricidad, por lo que hay que evitarlos.

Tipos de bombas.

Hay dos grupos principales de bombas: las rotodinámicas y las de desplazamiento positivo. Los nombres provienen de cómo las bombas transfieren la energía al medio que bombean, es decir, impulsor mediante un rotor impulsor que transfiere energía por una acción dinámica o moviendo un fluido por desplazamiento.

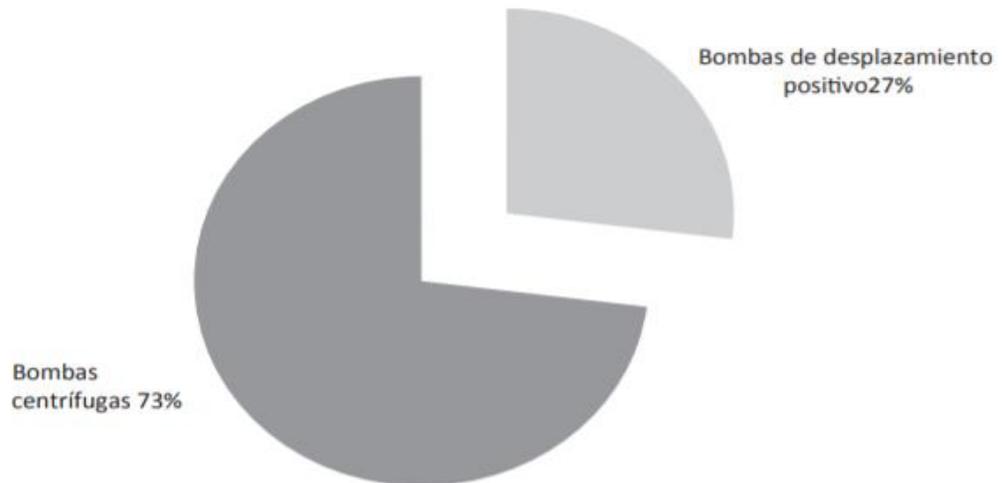


Ilustración 5: Tipos de bombas que se usan en la industria. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. (2018, octubre). Manual de optimización de sistemas de bombeo.[1]

Clasificación de bombas.

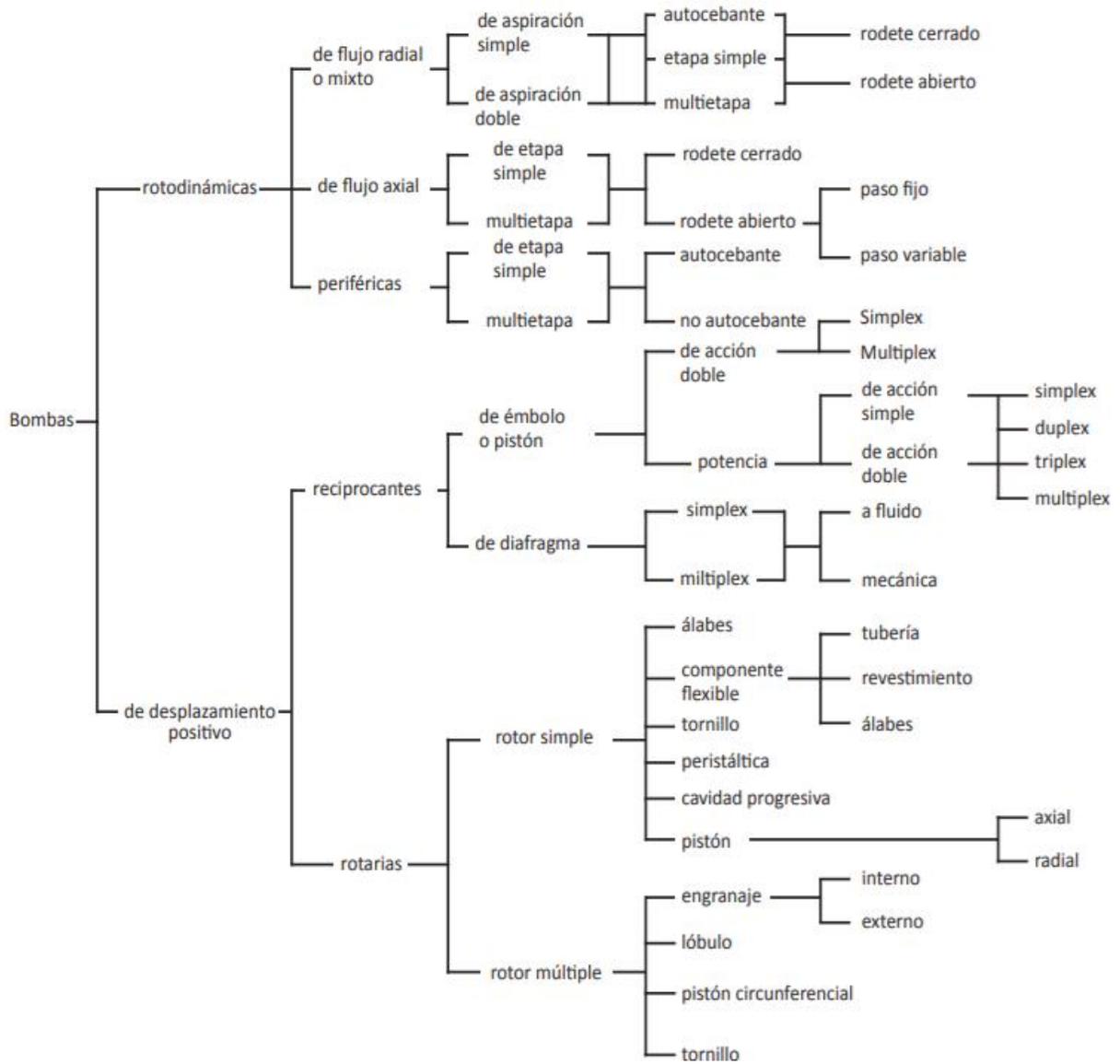


Ilustración 6: Tipos de bombas. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. (2018, octubre). Manual de optimización de sistemas de bombeo.

Bombas Centrifugas.

Las bombas rotodinámicas (centrífugas) transfieren energía a un fluido a través de un impulsor o rotor impulsor. El líquido ingresa en la succión de la bomba y pasa al centro del impulsor en donde se acelera hasta que alcanza una gran velocidad. Luego pasa a través de un difusor que convierte la carga de velocidad en carga de presión que sale a través de la descarga de la bomba

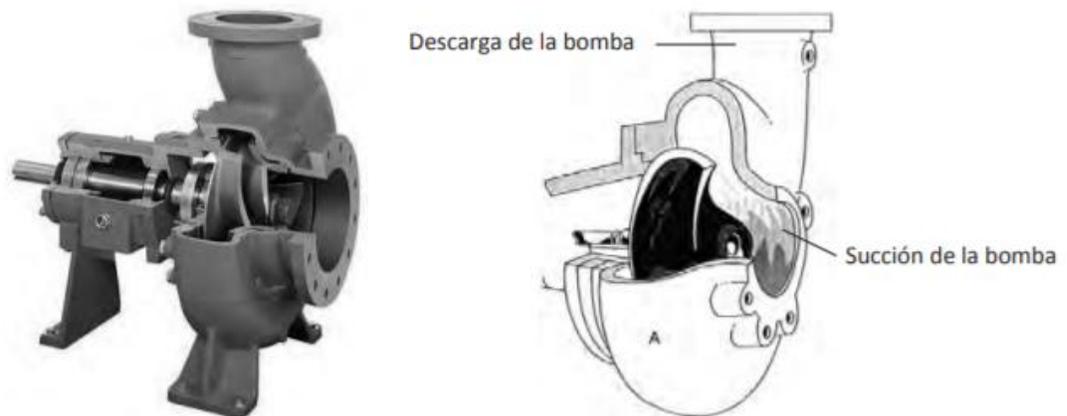


Ilustración 7: Bombas de succión axial. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. (2018, octubre). Manual de optimización de sistemas de bombeo.[1]

Las bombas centrífugas pueden ser horizontales o verticales, y hay montadas en bastidor o de acoplamiento directo

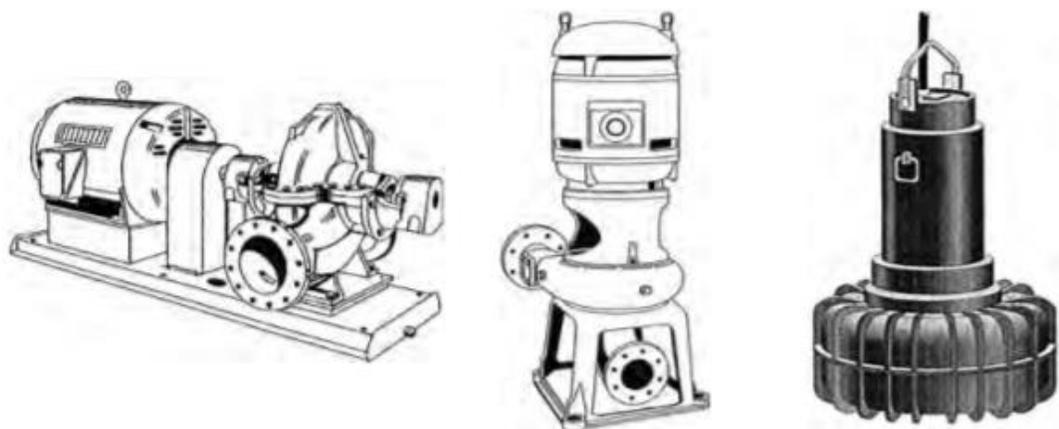


Ilustración 8: Bomba montada en bastidor y de acoplamiento directo. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. (2018, octubre). Manual de optimización de sistemas de bombeo.[1]

Hay tres categorías de bombas centrífugas según la dirección del flujo. En las bombas de flujo radial, la succión y la descarga de la bomba están a 90° grados. En las bombas de flujo mixto, la succión y la descarga están en un ángulo inferior a 180° pero superior a 90°. En las bombas de flujo axial, se empuja el agua desde la succión hasta la descarga, que están directamente enfrentadas

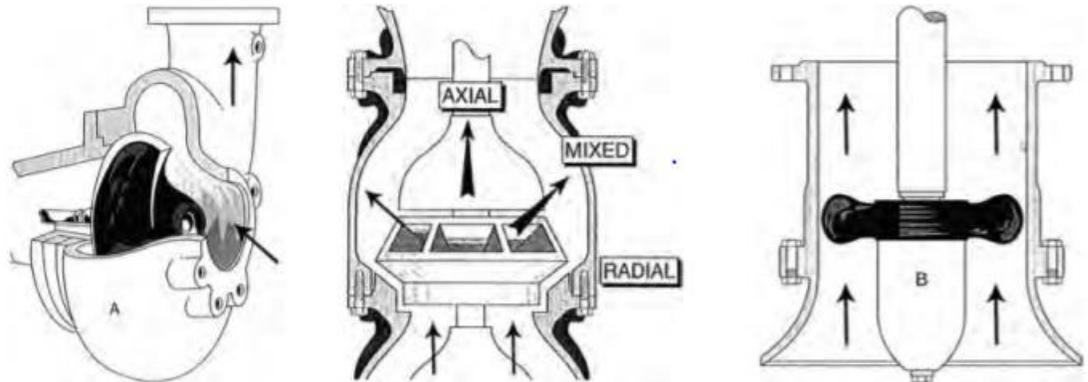


Ilustración 9: Direcciones del flujo de las bombas centrífugas (radiales, mixtas y axiales). Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. (2018, octubre). Manual de optimización de sistemas de bombeo.[1]

La mayor parte de las bombas del mercado son radiales o mixtas. Muchas veces, se las controla con válvulas reguladoras, por lo que ofrecen muy buenas oportunidades para generar ahorros energéticos. En muchas oportunidades, es posible controlar la bomba con variadores de velocidad, en lugar de usar válvulas reguladoras.

En los sistemas de bombeo de alta presión, como los sistemas de aguas municipales o en las bombas de alimentación de calderas, se aumenta la presión por medio de bombas multietapas, que dirigen el flujo que sale de la descarga de un impulsor a la succión del impulsor siguiente.

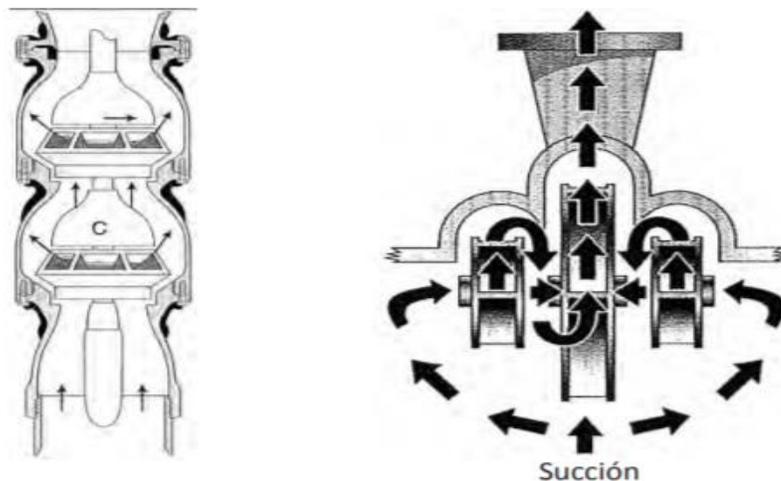


Ilustración 10: Bombas multietapas verticales y horizontales. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. (2018, octubre). Manual de optimización de sistemas de bombeo.

Características.

La configuración del impulsor y la cantidad de los impulsores de una bomba dependen del tipo de bomba. Los impulsores se clasifican por velocidad específica, tamaño y estilo.

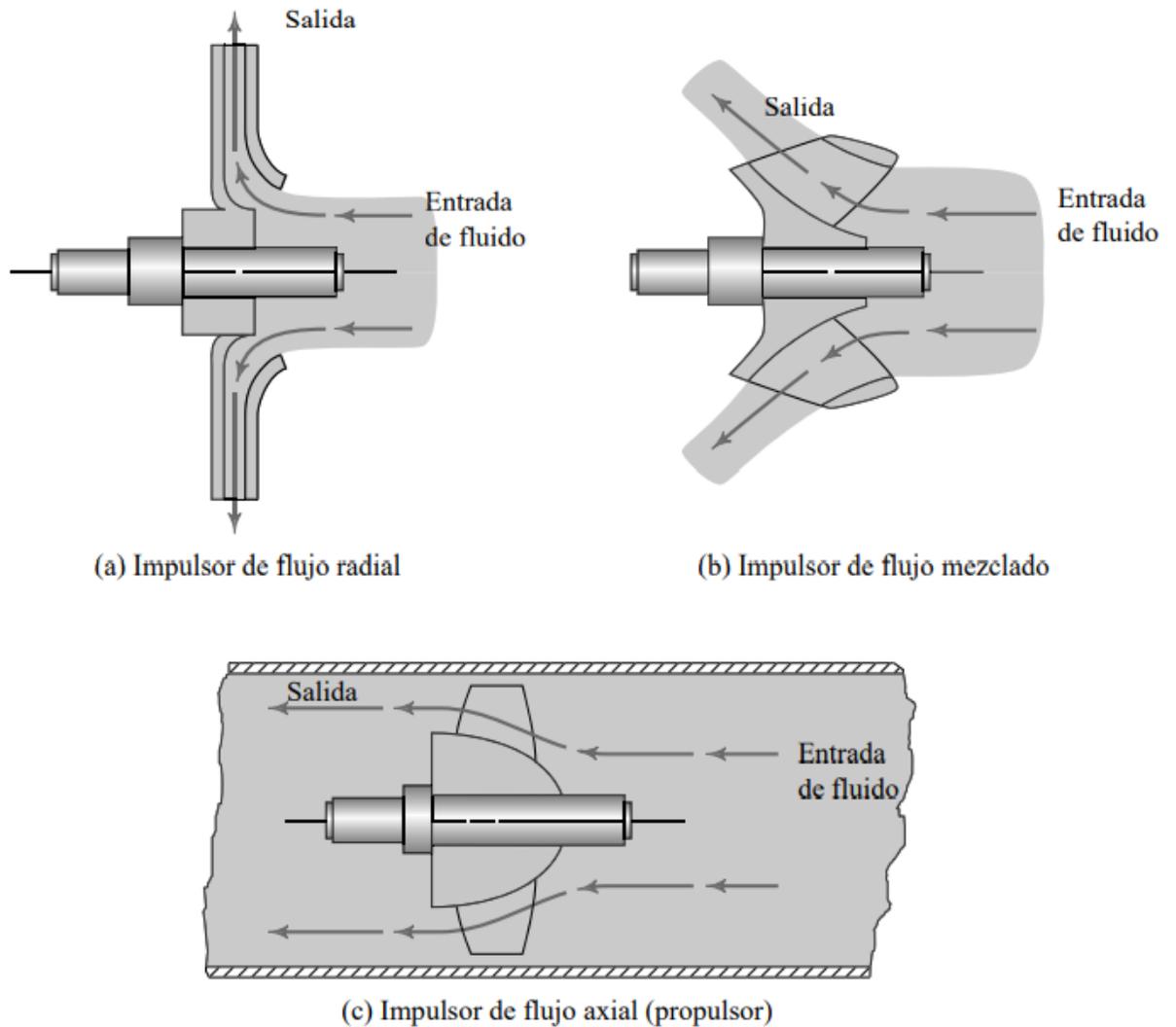


Ilustración 11 Tipos de impulsores. Robert L., M. (2015). *Mecánica De Fluidos - 7a Edición (7.a ed.)*. Pearson Educación.[2]

El impulsor semiabierto tiene una de sus caras cerrada por un disco. Su capacidad para bombear sólidos es menor que la de impulsor abierto, pero es muy eficiente para bombear sustancias químicas, papel y lodos. También se lo usa en otros procesos industriales. El diseño del impulsor abierto no tiene discos. Se usa, sobre todo, para

bombear fluidos que contienen sólidos grandes. Este tipo de impulsor es de baja eficiencia. Bombea grandes volúmenes a presiones bajas. El diseño del impulsor cerrado es muy eficiente.

Principios fundamentales de la hidráulica.

Se muestran los conocimientos básicos necesarios para comprender la relación entre las características del fluido y la operación de una bomba.

En los sistemas de bombeo existen relaciones fundamentales entre la potencia del fluido, el caudal, la altura de la bomba y la gravedad específica del fluido.

Flujo de fluido.

Una de las leyes fundamentales que rigen el flujo es la ley de Bernoulli . En su forma más sencilla establece las relaciones de presión y velocidad del fluido para un fluido sin fricción. la ley dice:

“En una corriente sin fricción, el total de energía es constante”

ECUACIÓN DE BERNOULLI

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

Muchas veces, se dividen los términos de la ecuación por la densidad y la constante gravitacional. Todos los términos pueden medirse en metros.

Por lo general, el caudal se expresa en galones por minuto (gpm) en los Estados Unidos y en metros cúbicos por hora (m³/h) o litros por segundo (l/s) en los países que usan el sistema métrico.

Cabeza.

Con respecto a los sistemas de bombeo, se puede caracterizar la cabeza como la medida de la energía total transferida al líquido a una velocidad y capacidad operativas específicas. Por lo general, la cabeza se expresa en pies o en metros. Cuando se usan manómetros para determinar la cabeza, pueden usarse las siguientes conversiones para el agua (gravedad específica 1,0).

Unidades de Estados Unidos

$$\text{cabeza (ft)} = 2,31 \times \text{presión (psi)}$$

Unidades métricas

$$\text{cabeza (m)} = \text{presión (kPa)} / 9,8$$

$$\text{cabeza (m)} = 10,2 \times \text{presión (bar)}$$

Ecuación 2: Unidades de presión cabeza de bomba. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. (2018, octubre). Manual de optimización de sistemas de bombeo.

En los Estados Unidos, la presión se expresa en unidades absolutas (psia) o unidades manométricas (psig). En el sistema métrico, las presiones se miden por lo general en kPa o en bares. Son siempre manométricas, a menos que se indique lo contrario. En los manómetros, la presión se establece en relación con la presión atmosférica, mientras que la presión absoluta incluye la presión atmosférica. La cabeza total de un sistema, que la bomba debe vencer, está formada por los componentes siguientes:

- Cabeza estática.
- Cabeza de velocidad.
- Cabeza por fricción o cabeza dinámica

Cabeza estática.

La cabeza estática es la diferencia de elevación entre la superficie del líquido en contenedores que están en la entrada y en la salida de la bomba. Si la bomba opera en un sistema cerrado con una presión diferente a la presión atmosférica hay que tener en cuenta esta presión también. La presión estática es independiente del caudal. En el diagrama de la curva del sistema, se la representa como una línea recta. La energía necesaria para superar la presión estática depende únicamente de la altura y de la densidad del fluido bombeado. Por lo tanto, no varía si hay cambios en el caudal.[3]

Cabeza de velocidad.

La cabeza de velocidad es la cantidad de energía que debe tener un líquido para moverse a una velocidad determinada

$$h_v = \frac{V^2}{2g}$$

$$h_v = \text{cabeza de velocidad (ft o m)}$$

$$V = \text{velocidad del líquido (pies o metros por segundo)}$$

$$g = \text{aceleración gravitacional} = 9,81 \text{ m/s}^2 \text{ (32,2 ft/s}^2\text{)}$$

Ecuación 3: Formula Cabeza de Velocidad. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. (2018, octubre). Manual de optimización de sistemas de bombeo.[1]

Por lo general, primero hay que calcular la velocidad usando la ecuación.

$$V = \frac{Q}{A}$$

Q = caudal en cfs (gpm * 0,00223) o m³/seg
 V = velocidad del líquido (pies o metros por segundo)
 A = área de la tubería (3.14 * r^2) con r en pies o metros

Ecuación 4: Formula de Velocidad. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. (2018, octubre). Manual de optimización de sistemas de bombeo.[1]

Cabeza por fricción.

La cabeza por fricción es la cabeza que se necesita para superar las pérdidas por fricción en las tuberías y en los componentes de las tuberías del sistema de bombeo. Depende del caudal, de las características de la tubería, de las conexiones y válvulas, y de las propiedades del fluido. En algunos sistemas de bombeo, las pérdidas por fricción incluyen las pérdidas al ingreso de la succión y las que se producen a la salida, en el punto de descarga.

La cabeza por fricción o cabeza dinámica depende del cuadrado del caudal. Esto quiere decir que cuando el caudal se duplica, la presión necesaria para superar las pérdidas por fricción se multiplica por cuatro. Por lo tanto, la disminución del caudal tiene un gran impacto sobre la presión que se necesita y, en consecuencia, sobre la potencia requerida.

Todos los componentes por los que pasa el fluido son fuentes de fricción: paredes de las tuberías, válvulas, codos, uniones en T, reductores/expansiones, uniones de expansión, y tanques de entrada y de salida. Existen datos experimentales de pérdidas por fricción recopilados a través de muchos años. Los datos están en distintos formatos, tales como diagramas de Moody, cuadros del Hydraulic Institute, etc.[3]

Fricción en las tuberías.

Por lo general, las pérdidas de presión en las tuberías y otros componentes se miden en pies en función del caudal. Normalmente, se las estima usando la ecuación de Darcy-Weisbach y la ecuación de Hazen Williams.

La ecuación de Darcy-Weisbach es muy útil para comprender los parámetros que intervienen en las pérdidas por fricción en las tuberías:

ECUACIÓN DE DARCY PARA LA PÉRDIDA DE ENERGÍA

$$h_L = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g}$$

Ecuación 5: Ecuación de Darcy - Weisbach. Robert L., M. (2015). Mecánica De Fluidos - 7a Edición (7.a ed.). Pearson Educación.[2]

El factor de fricción depende de la rugosidad de la tubería, la viscosidad del fluido que se bombea, el tamaño de la tubería y la velocidad del fluido.

El método de Hazen-Williams también se usa para calcular las pérdidas por fricción en las tuberías, pero solo sirve para sistemas de agua con flujo turbulento. El coeficiente de Hazen-Williams C es un factor que tiene en cuenta la rugosidad de la tubería. Las tuberías nuevas y lisas tienen un valor de C de 140 (mientras que las tuberías nuevas de PVC tienen a veces un valor más alto). Las tuberías más viejas tienen un valor de C inferior a 100.

<i>Unidades métricas</i>	$\Delta h_f =$ pérdida de cabeza en metros
$\Delta h_f = \left[\frac{10.7 L Q^{1.852}}{C^{1.852} D^{4.87}} \right]$	L = longitud(m)
	Q = caudal (m ³ /s)
	D = diámetro de la tubería (m)
	C = coeficiente de Hazen Williams (rango entre 60 y160)

Ecuación 6: Ecuación de Hazen-Williams sistema métrico. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. (2018, octubre). Manual de optimización de sistemas de bombeo.[1]

FÓRMULA DE HAZEN-WILLIAMS —UNIDADES DE USO COMÚN EN ESTADOS UNIDOS

$$v = 1.32 C_h R^{0.63} s^{0.54}$$

Ecuación 7: Formula de Hazen-Williams sistema americano. Robert L., M. (2015). Mecánica De Fluidos - 7a Edición (7.a ed.). Pearson Educación.[2]

Fricción en los accesorios de las tuberías.

Las pérdidas de fricción de los accesorios de una tubería, tales como válvulas, codos y conexiones en T, se calculan sobre todo a partir de datos experimentales. Por lo general, cuando se hace referencia a estas pérdidas, se las califica de pérdidas menores. Sin embargo, en muchos sistemas de tuberías, estas pérdidas menores constituyen una parte importante de las pérdidas por fricción, sobre todo cuando se usan válvulas de control para

reducir el caudal. Las pérdidas por fricción de los componentes de las tuberías se calculan normalmente a partir de la cabeza de velocidad.

$$\Delta D h_f = K * \frac{V^2}{2g}$$

h_f = pérdida de cabeza por fricción (ft o m)
 K = coeficiente de pérdida
 V = velocidad del fluido (ft/s o m/s)
 g = constante gravitacional (ft/s² o m/s²)

Ecuación 8: Ecuación de Darcy -Weisbach para calcular las pérdidas por fricción en componentes de tuberías. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. (2018, octubre). Manual de optimización de sistemas de bombeo.[1]

K es el coeficiente de pérdida. Depende del tamaño y, en el caso de las válvulas, del tipo de válvula y del porcentaje de apertura. En el caso de los componentes normalizados, hay varias fuentes

Tipo de componente	K
Codo a 90° normalizado	0,2 - 0,3
Codo a 90°, radio largo	0,1 - 0,2
Ingreso de borde recto (desde un tanque)	0,5
Ingreso boca de campana	0,05
Descarga al tanque	1
Unión en T (flujo a un ramal)	0,3 - 1
Válvula de retención oscilante	2
Válvula de compuerta (completamente abierta)	0,03 - 0,2
Válvula de globo (completamente abierta)	3 - 10
Válvula mariposa (completamente abierta)	0,5 - 2
Válvula de bola (completamente abierta)	0,04 - 0,1

Tabla 1: Ilustración 20: Tabla de pérdidas por fricción en accesorios. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. (2018, octubre). Manual de optimización de sistemas de bombeo.[1]

Desempeño de la bomba.

Principios Generales.

El diseño de las bombas centrífugas está caracterizado por la presencia de por lo menos un impulsor con álabes que rota dentro de la carcasa de la bomba. Cuando giran, los impulsores transfieren energía al fluido. Esta energía se usa para mover el líquido o aumentar la temperatura, o ambos. Las bombas centrífugas o rotodinámicas se dividen en dos grandes grupos, las bombas radiales y las axiales. Además, hay otras bombas que tiene características intermedias. Se las denomina bombas de flujo mixto. El segundo gran grupo de bombas está conformado por las bombas de desplazamiento positivo, que para transferir energía al fluido lo contienen y lo desplazan dentro de las paredes de la bomba para descargarlo por las aberturas o válvulas que están a la salida. Las bombas de desplazamiento positivo no se comportan igual que las bombas centrífugas.

Curvas de la bomba.

El desempeño de las bombas centrífugas puede graficarse en un diagrama, que recoge los datos de la cabeza (H) en función del caudal (Q). Además, en el mismo diagrama pueden representarse otros parámetros, como la eficiencia la potencia del eje y la cabeza neta positiva de succión (NPSH por sus siglas en inglés).[3]

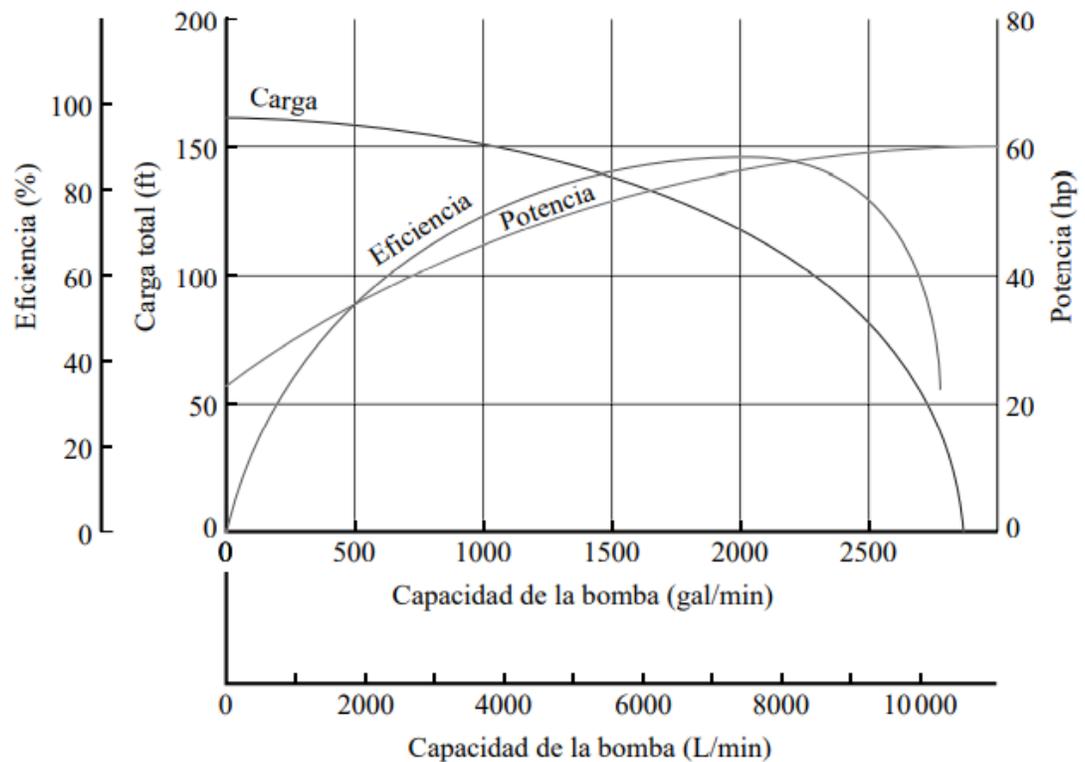


Ilustración 12: Curva de desempeño de una bomba. Robert L., M. (2015). *Mecánica De Fluidos - 7a Edición* (7.a ed.). Pearson Educación.[2]

Leyes de afinidad.

Los cambios en el desempeño de la bomba están regidos por las leyes de afinidad.

Estas leyes describen cómo cambia el desempeño de la bomba cuando se introducen modificaciones en la velocidad o en el diámetro del impulsor. Las leyes de afinidad se usan para calcular cómo cambian las curvas de desempeño de la bomba cuando hay cambios en su geometría o velocidad. Sin embargo, no dan ninguna información sobre cuál va a ser el nuevo punto operativo del sistema cuando se conecte la nueva bomba. Para poder determinar este nuevo punto operativo, se necesita información sobre la curva del sistema del que forma parte la nueva bomba.

Por otro lado, debe conocerse la curva del sistema para calcular con precisión los ahorros energéticos derivados de una reducción de la velocidad o del recorte del impulsor. Cualquier equivocación al respecto puede conducir a errores importantes.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{h_{a1}}{h_{a2}} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

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

Ecuación 9: Ecuaciones de afinidad respecto a la velocidad de rotación. Robert L., M. (2015).
Mecánica De Fluidos - 7a Edición (7.a ed.). Pearson Educación.[2]

Q = caudal, N = velocidad de rotación, H = cabeza, y P = potencia. Los subíndices 1 y 2 representan dos velocidades diferentes

La segunda ecuación de las leyes de afinidad se refiere al diámetro del impulsor D:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{D_1}{D_2}$$

$$\frac{h_{a1}}{h_{a2}} = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^3$$

. Ecuación 10: Ecuaciones de afinidad respecto al diámetro del impulsor. Robert L., M. (2015).
Mecánica De Fluidos - 7a Edición (7.a ed.). Pearson Educación.[2]

Punto de funcionamiento de la bomba.

La bomba funciona en el punto de la curva en el que hay equilibrio entre la presión que entrega la bomba y la presión necesaria para que un caudal determinado circule a través

del sistema al que la bomba pertenece. El punto de funcionamiento es la intersección entre la curva del sistema y la de la bomba.

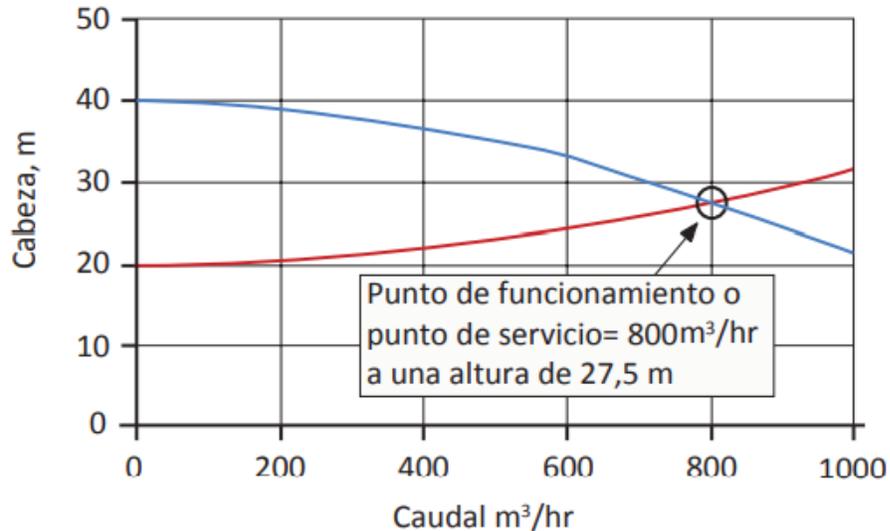


Ilustración 13: Punto de Operación de la bomba. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. (2018, octubre). Manual de optimización de sistemas de bombeo[1].

De ello se deduce que cuando el punto de funcionamiento se mueve hacia la izquierda en la curva de la bomba, las fuerzas internas del impulsor de la bomba aumentan, lo que puede limitar la vida útil del equipo. Por lo tanto, hay que evitar que la bomba funcione en un punto muy arriba de la curva de la bomba por mucho tiempo. Por esta razón, los fabricantes proveen información sobre la región de funcionamiento admisible. Si se opera la bomba fuera de los límites de esta región durante mucho tiempo, la vida útil del equipo puede verse seriamente afectada.

Bombas conectadas en paralelo.

Muchas aplicaciones tienen bombas conectadas en paralelo. Esta solución proporciona flexibilidad y redundancia. Cuando las bombas operan en paralelo, se puede cambiar el caudal en pasos según la cantidad y el tamaño de las bombas que están funcionando al mismo tiempo. El caudal de cada una de las bombas que están en funcionamiento se suma a una presión constante. Si la presión de cierre (máxima presión que la bomba puede generar) de las bombas no coincide, hay que tener cuidado de que ninguna bomba opere a una presión mayor que la presión máxima recomendada para la bomba con la menor presión de cierre. De no ser así, la bomba más pequeña estará operando peligrosamente fuera de la región recomendada o hasta podría suceder que el flujo reingrese en la bomba. Para evitar riesgos, conviene usar un sistema que controle qué bombas están encendidas.

Bombas conectadas en serie.

Así cómo es posible conectar bombas en paralelo, también pueden conectarse en serie. Se suele recurrir a esta solución cuando se necesitan cabezas elevadas. La curva de las bombas combinadas se obtiene sumando la presión que generan todos los caudales.

Cavitación.

La temperatura de ebullición de un fluido depende de la presión a la que está sometido. La temperatura de ebullición del agua a presión atmosférica es de 100°C. Como se sabe, a gran altitud el agua hierve a menos de 100°C

La presión de un sistema de fluidos está regida por la ley de Bernoulli. Si la velocidad del fluido es muy alta, la presión disminuye. Además, la presión depende de cuánta fricción hay en el sistema. Debido a estos dos hechos, no es inusual que la presión en la succión de un impulsor pueda llegar a ser tan baja que permita que el líquido hierva o que se formen cavidades de vapor a temperatura ambiente. La presión baja en el ingreso puede provenir de pérdidas de presión desde el punto de origen del líquido o de que el fluido ingrese en el impulsor con una velocidad muy alta. Esto hace que se formen burbujas de vapor que se trasladan con el flujo. Dado que la finalidad de la bomba es aumentar la presión, las burbujas van llegando a áreas de mayor presión, en la que se implosionan. Si la implosión se produce en el centro de la corriente de fluido, se produce una implosión no uniforme sin consecuencias preocupantes. Por el contrario, si en el momento de la implosión la burbuja se está moviendo sobre una superficie, del lado de esa superficie no llega fluido que pueda llenar la cavidad, mientras que el líquido que llena la cavidad desde los otros lados forma un micro chorro que impacta sobre la superficie.

Estos micro chorros pueden llegar a ser tan potentes que remueven material de las tuberías. Después de mucho tiempo de bombardeo, las superficies expuestas a la cavitación se van deteriorando y exhiben un aspecto muy disparejo.

La única forma de evitar la cavitación es aumentar la presión a un nivel tal que no se formen burbujas de vapor. Para poder determinar qué nivel de presión se necesita para evitar que se produzca cavitación, hay que comparar la presión del líquido con la presión del vapor del fluido a la temperatura en cuestión. A tal efecto, se emplea el término cabeza neta positiva de succión (NPSH), que es la medida de la presión real de un líquido y la presión del vapor del líquido a una temperatura dada.

Para calcular la presión disponible sobre la presión del vapor, calculamos la NPSH disponible (NPSHD): $NPSH = H_s + H_a - H_{vp} - H_f$

Dónde:

- H_s = cabeza estática por arriba de la línea central del impulsor.
- H_a = presión sobre la superficie libre del líquido en el tanque de succión.
- H_{vp} = presión del vapor del líquido.
- H_f = todas las pérdidas por fricción del lado del ingreso de la bomba.

La NPSHD se compara con la NPSH requerida (NPSHR) que puede consultarse en los materiales del fabricante de la bomba a partir de ensayos para determinar el punto en que la bomba empieza a cavitarse. La NPSHR se mide en el punto en que la presión de la descarga cae un 3% con respecto al funcionamiento sin cavitación. Es decir, en ese punto la bomba ya está cavitando. Se han probado muchas formas de definir un margen seguro por encima de la NPSHD para evitar la cavitación. Hasta ahora, los fabricantes no han logrado llegar a un acuerdo respecto de ese margen. Si existe un riesgo de cavitación, el responsable del diseño debe contactar al fabricante de la bomba y solicitar asesoramiento acerca de la amplitud del margen para su caso específico.

V. METODOLOGÍA

Reconocimiento de la compañía.

Se inicia con el reconocimiento de los lugares de trabajo, equipo de trabajo, dependencias del área y de la compañía y el rol que ejerce en la operación, su historia, misión y visión, inducciones, manejo de los elementos de protección personal, seguridad en la mina, rutas de acceso a las minas, estaciones de bombeo.

Recopilación de la información.

Recopilación y revisión de la documentación técnica y científica de los diferentes procesos involucrados en el proceso de bombeo en la minera. A través de las bases de datos y la bibliografía se recopila información requerida para el desarrollo del trabajo

Inventario de los equipos.

Se cuantifican y se listan tanto los equipos en operación, como los de respaldo, curvas de operación de bombas.

Medición de parámetros de bombeo.

Se toman medidas de con instrumentos de caudal, presión, tipos y diámetros de tuberías, corrientes, consumos, horas de trabajo (manómetros, caudalímetros, amperímetros) se miden alturas y pérdidas por fricción y se estiman medidas mediante curvas y puntos de operación y balances, dado que los instrumentos de medición no se encuentran en todas las estaciones de bombeo, también en apoyo con topografía medición de tanques y pozas de captación de agua.

Levantamiento de Planos y memorias descriptivas del servicio de bombeo.

Con la información recopilada se realizan unifilares en los cuales se describen ubicaciones, equipos, capacidades de tanques, potencias instaladas, diámetros de tubería y rutas de tubería, tanto en el sistema actual de mina como en los proyectados, se realizan memorias descriptivas de principios de funcionamiento de los sistemas hidráulicos instalados en mina, para apoyar a firmas consultoras que actualmente trabajan para mejorar los diseños que se tienen en operación.

Cronograma de mantenimiento de tanques y sedimentadores.

Se planifica el deslode de tanques y se diseñan estrategias para el manejo de estos, ya que es un factor que afecta es sistema dado que en las estaciones de secado estos ya que estos lixiviados retornan al sistema con grandes cantidades de sólidos

que dañan los impulsores de los equipos, se debe tener un seguimiento juicioso de esto ya que si se satura el sistema de lodos el sistema colapsa y se inundan las labores de operación.

Reuniones y recorridos de mina.

Se asisten a reuniones con Superintendentes de mina, jefes de mina, jefes de turno y demás áreas involucradas en la operación, por nombrar algunas: servicios auxiliares, proyectos especiales, ambiental, geomecánica, hidrogeología, mantenimiento eléctrico, mantenimiento mecánico, contratistas, geología de mina, logística, seguridad y salud etc. Los cuales hacen reportes de las novedades presentadas en cada turno y de cantidades de mineral extraídos.

En los recorridos con jefes de turno ya sean superintendentes, jefes de mina, coordinadores de servicios u operarios y se visitan estaciones y frentes de trabajo para reportar fallas o contingencias y elaborar planes de acción para la mitigación de estos.

Identificación de fallas y mejoras en el sistema de bombeo.

El sistema actual se vienen desarrollando actualmente proyectos relacionados con el bombeo, en mina Sandra K se busca reemplazar las 3 estaciones que hay actualmente por una sola ubicada en el nivel 6, en mina Providencia se inicia la construcción de un nuevo tanque de bombeo que reemplace Tanque 3 que por una condición de inestabilidad se está derrumbando y este es de vital importancia ya que es un tanque que recoge todas las aguas provenientes de tanques auxiliares y controlan las inundaciones de la rampa principal, también en mina El Silencio tanques de mucha antigüedad se vienen cayendo dada las condiciones de las labores, se comparte entonces los unifilares proyectados y simulación de nuevo proyecto.

VI.RESULTADOS

- Se identifican estaciones y equipo de bombeo más críticos en la operación ya que al salir de funcionamiento, conlleva a inundaciones en labores que afectaría la producción los cuales son:

Para mina El Silencio:

Estación nivel 23
Estación nivel 30 apique 0
Estaciones seriadas desde el nivel 34 al 28

Para mina Providencia:

Estación nivel 4
Estación nivel 3 ½
Estación nivel 6 ½
Estación 3980 nivel 9 ½
Estación Tanque 3 nivel 14
Estación Tanque 4 nivel 16

Para mina Sandra K:

Estación nivel 3 1/2

- Se realiza simulación con software PumpSim.

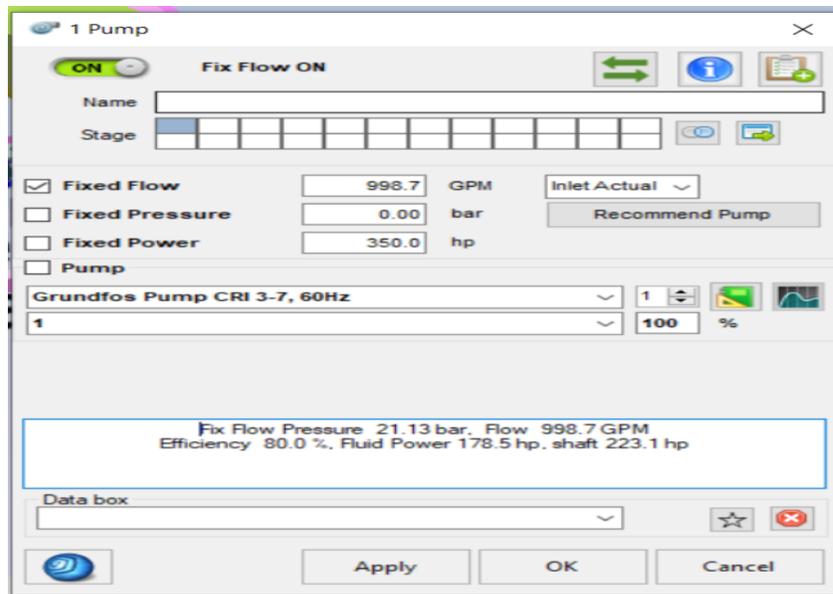


Ilustración 14: Simulación software Pumpsim Proyecto mina Sandra K[4]

- Se realizan balances de caudales con datos medidos en campo

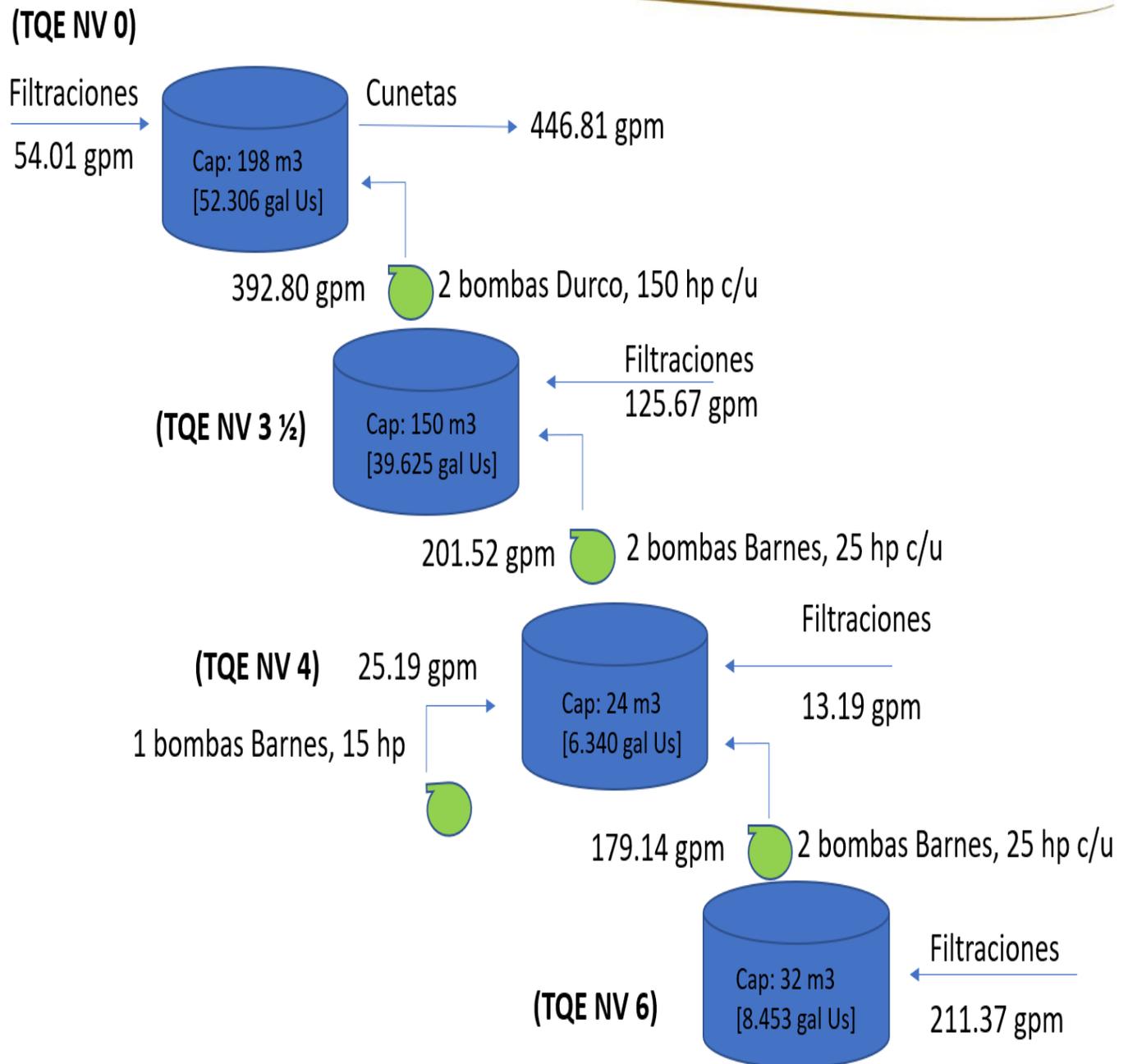


Ilustración 15: Balance de caudales sistema actual mina Sandra K

- Se realiza balance de caudales teóricos con curvas de bombas, curva del sistema, alturas dinámicas recopilación de datos de horas de trabajo de equipos por día, teniendo en cuenta las pérdidas por fricción, diámetros y tipos de tubería, dado que no se tienen medidores de caudal instalados en la red de bombeo en mina El Silencio.



Ilustración 16: Horas de operación día equipos de bombeo mina El Silencio

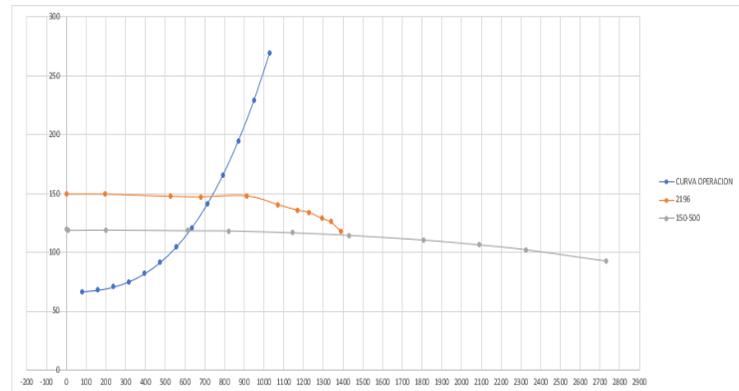
DIAMETRO INTERNO 0.1308
 LONGITUD 155 178.25
 C 110
 R 6319.0966

$$hf_{[m]} = 10,67 \cdot \left(\frac{Q_{[m^3/s]}}{C} \right)^{1,852} \frac{L_{[m]}}{D^{4,87} [m]}$$

Q GPM	Q US	Q M3S	
			66.7
79.25	5	0.005	0.3460568 67.046057
158.5	10	0.01	1.2492662 68.295223
237.75	15	0.015	2.6471345 70.942458
317	20	0.02	4.5038546 75.452312
396.25	25	0.025	6.8177314 82.270044
475.5	30	0.03	9.5561631 91.826207
554.75	35	0.035	12.713614 104.53982
634	40	0.04	16.280588 120.82041
713.25	45	0.045	20.249046 141.06345
792.5	50	0.05	24.61203 165.88148
871.75	55	0.055	29.363424 195.04491
951	60	0.06	34.437777 229.54269
1030.25	65	0.065	40.010782 269.55287
1046.1	66	0.066	41.5783 310.7105
1061.95	67	0.067	42.35987 353.03048
1077.8	68	0.068	43.43722 396.5277

4x6-10	
gpm	m
0	149.6
196.31	149.5652
528.2287	147.8261
680.6272	147.2913
911.8083	148.2609
1063.373	140.8636
1170.111	136.087
1225.646	134.3478
1294.096	129.1304
1338.008	126.087
1389.668	118.2609

150-500 (480)	
gpm	m
0	120
10.42569	118.9247
198.0885	119.1039
612.5109	118.5663
821.025	118.3871
1146.829	116.7742
1430.929	114.6237
1806.255	110.5914
2090.356	106.4695
2324.935	102.3477
2731.538	92.67026



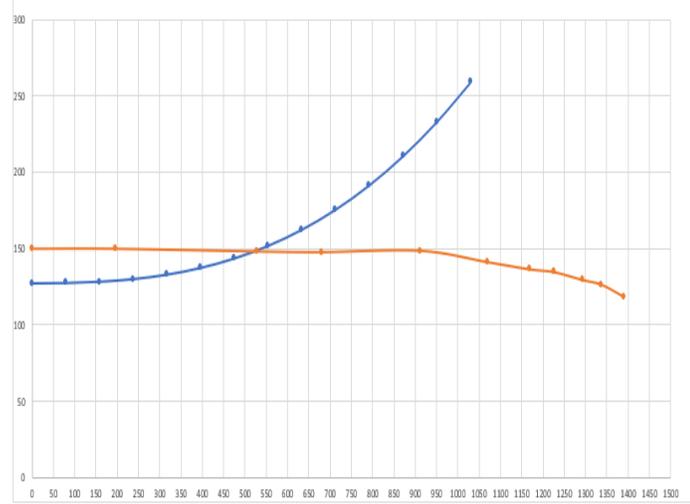
TIPO DE BOMBA	GPM	HORAS/DIA	GALONES/DIA
150-500	610	13.4	804 490440
2196	730	19.5	1170 854100
			1344540



DIAMETRO INTERNO	0.154	
LONGITUD	262	301.3
C	120	
R	4104.8186	

$$hf_{[m]} = 10,67 \cdot \left(\frac{Q_{[m^3/s]}}{C} \right)^{1,852} \frac{L_{[m]}}{D_{[m]}^{4,87}}$$

Q GPM	Q L/S	Q M3/S		
0				127
79.25	5	0.005	0.224794883	127.2247949
158.5	10	0.01	0.811510181	128.0363051
237.75	15	0.015	1.718550938	129.7558558
317	20	0.02	2.929554116	132.6854039
396.25	25	0.025	4.428726593	137.1141365
475.5	30	0.03	6.207583023	143.3217195
554.75	35	0.035	8.259623651	151.5803491
634	40	0.04	10.57589888	162.156048
713.25	45	0.045	13.1536722	175.3006152
792.5	50	0.05	15.98771585	191.2973311
871.75	55	0.055	19.07417109	210.3716022
951	60	0.06	22.40939277	232.780895
1030.25	65	0.065	25.9909329	258.7710882



4x6-10	
gpm	m
0	149.6
196.31	149.5652
528.2287	147.8261
680.6272	147.3913
911.8083	148.2609
1069.373	140.8696
1170.111	136.087
1225.646	134.3478
1294.096	129.1304
1338.008	126.087
1389.668	118.2609

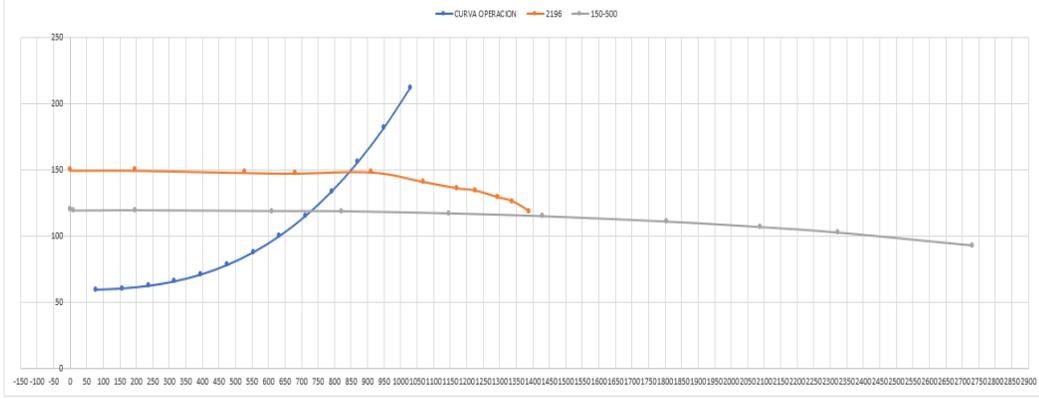
GPM	HORAS/DIA	GPM	GALONES/DIA	
525	9.2	552	289800	201.25
525	19.7	1182	620550	430.9375
			910350	



DIAMETRO INTERNO	0.1308	
LONGITUD	117	134.55
C	110	
R	4769.89869	

$$hf_{[m]} = 10,67 \cdot \left(\frac{Q_{[m^3/s]}}{C} \right)^{1,852} \frac{L_{[m]}}{D_{[m]}^{4,87}}$$

Q GPM	Q L/S	Q M3/S		
				58.8
79.25	5	0.005	0.2612171	59.0612171
158.5	10	0.01	0.94299449	60.0042116
237.75	15	0.015	1.99815957	62.0023712
317	20	0.02	3.40421285	65.406584
396.25	25	0.025	5.14628758	70.5528716
475.5	30	0.03	7.21336186	77.7662335
554.75	35	0.035	9.59672773	87.3629612
634	40	0.04	12.2892183	99.6521795
713.25	45	0.045	15.2847638	114.936943
792.5	50	0.05	18.5781131	133.515056
871.75	55	0.055	22.1646489	155.679705
951	60	0.06	26.0402573	181.719963
1030.25	65	0.065	30.2012343	211.921197



4x6-10	
gpm	m
0	149.6
196.31	149.5652
528.2287	147.8261
680.6272	147.3913
911.8083	148.2609
1069.373	140.8696
1170.111	136.087
1225.646	134.3478
1294.096	129.1304
1338.008	126.087
1389.668	118.2609

150-500 (480)	
gpm	m
0	120
10.42569	118.9247
198.0885	119.1039
612.5109	118.5663
821.025	118.3871
1146.829	116.7742
1430.929	114.6237
1806.255	110.5914
2090.356	106.4695
2324.935	102.3477
2731.538	92.67026

TIPO DE BOM	GPM	HORAS/DIA	GALONES DIA	
2196	840	16	960	806400
150-500	725	4.57	274.2	198795
				138.052083
				1005195



Galones por día

Nv7	1344540	
Nv16	910350	
Nv19	1005195	
Nv23	1077300	
Nv30	158400	1071900
Nv34	913500	
Nv39	603420	

Ilustración 17: Balance total galones por día mina El Silencio

Lo que en teoría sucede es que en la estación de bombeo del nivel 16 se debe estar presentando un rebose ya que el bombeo en el sistema inferior está superando el del nivel superior, pero es complicado predecir este fenómeno dado que el tanque del nivel 16 es una labor antigua inundada, y esta presenta fallas geomecánicas y podría tener fugas hacia labores en niveles inferiores, el valor en el nivel 23 se reciben las aguas tanto del nivel 30 como del nivel 34 por esto se suman los caudales que se encuentran en color amarillo.

- Se caracteriza el total de estaciones de bombeo de las minas en los que se describen, presiones de trabajo, caudales, marca del equipo y la potencia como se muestra en se muestran en unifilares.

UNIFILAR BOMBEO MINA EL SILENCIO ACTUAL

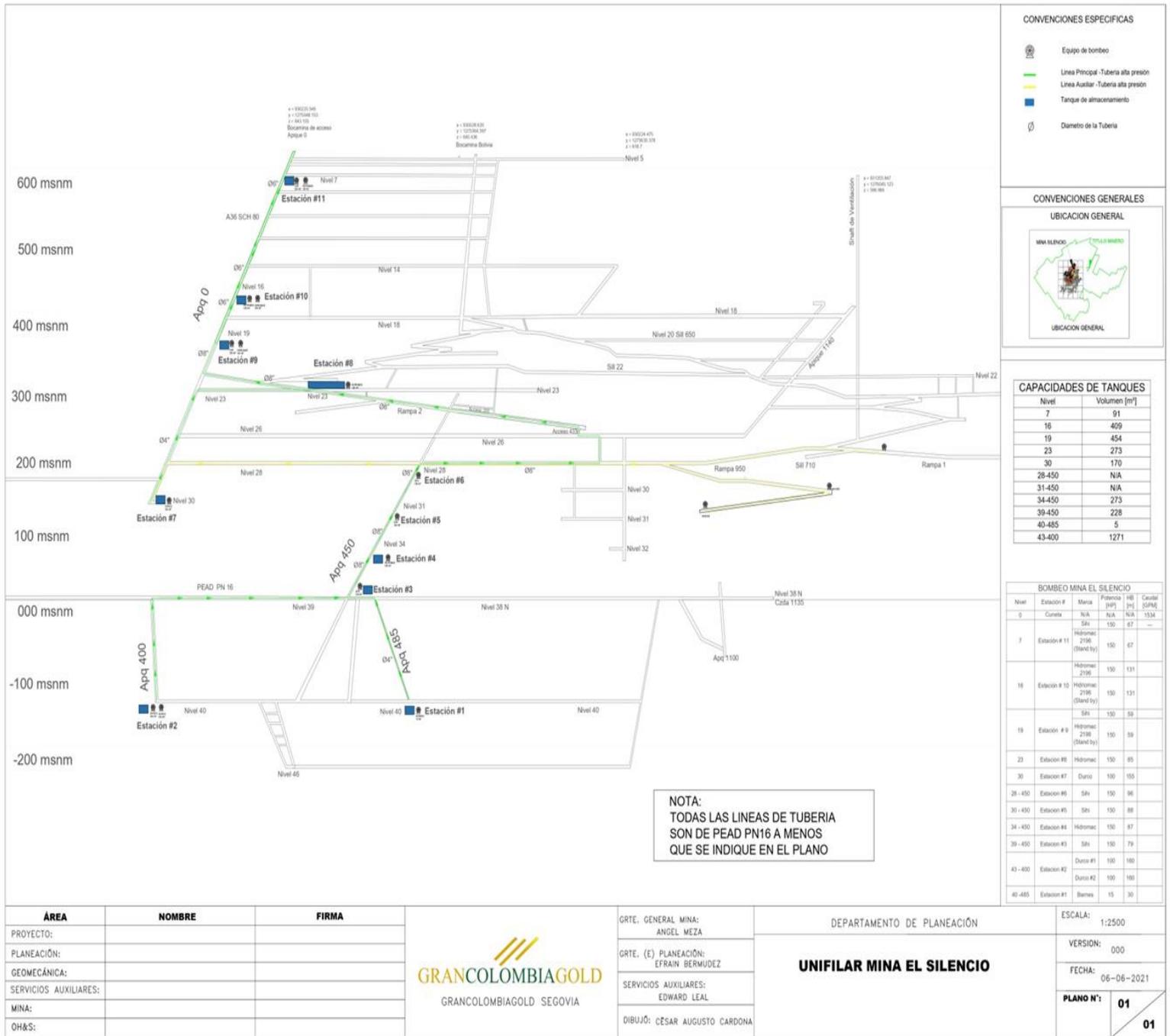


Ilustración 18:Unifilar mina El Silencio Actual

UNIFILAR BOMBEO MINA SANDRA K ACTUAL

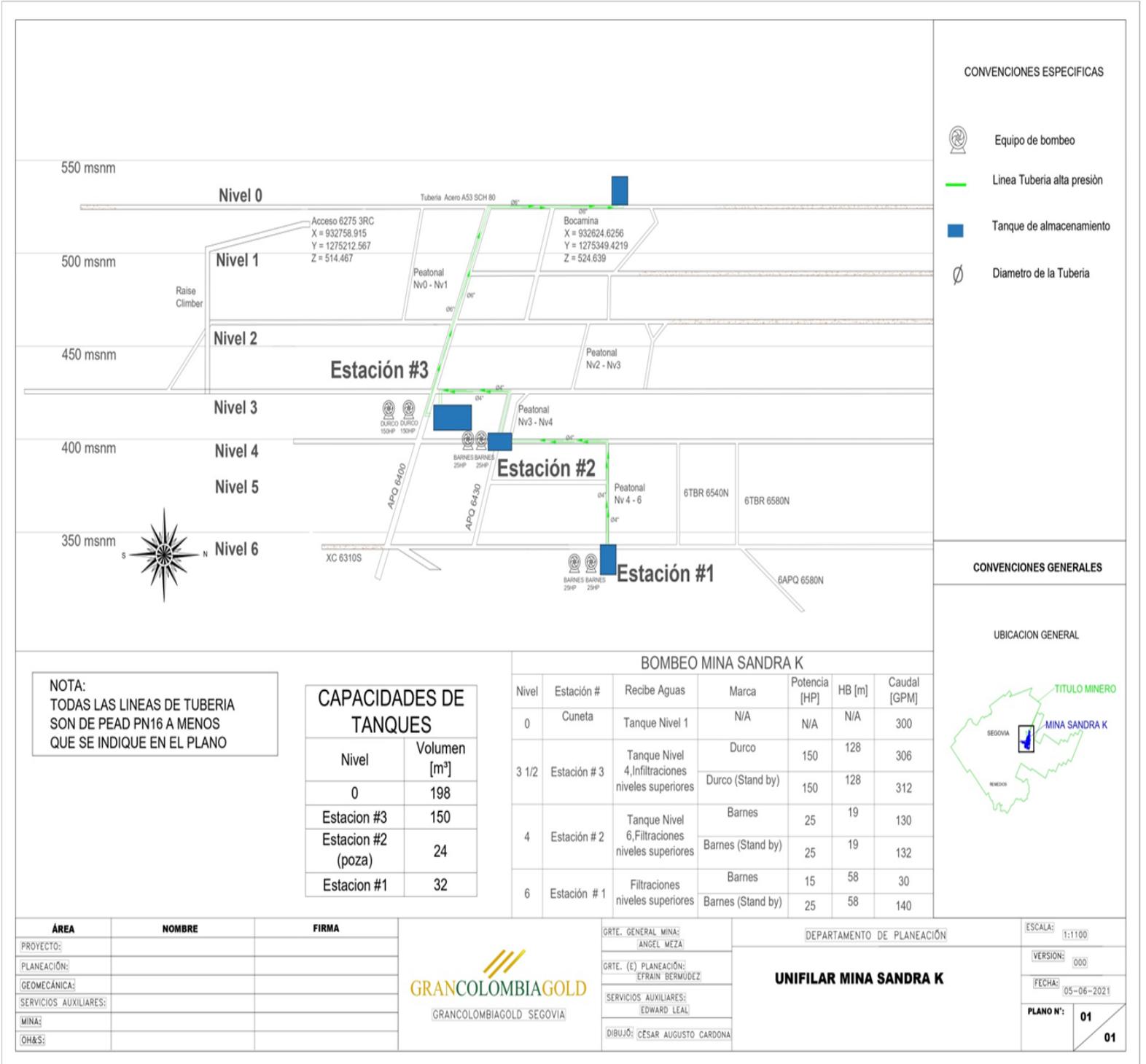


Ilustración 19: Unifilar mina Sandra K Actual

UNIFILAR BOMBEO MINA PROVIDENCIA ACTUAL

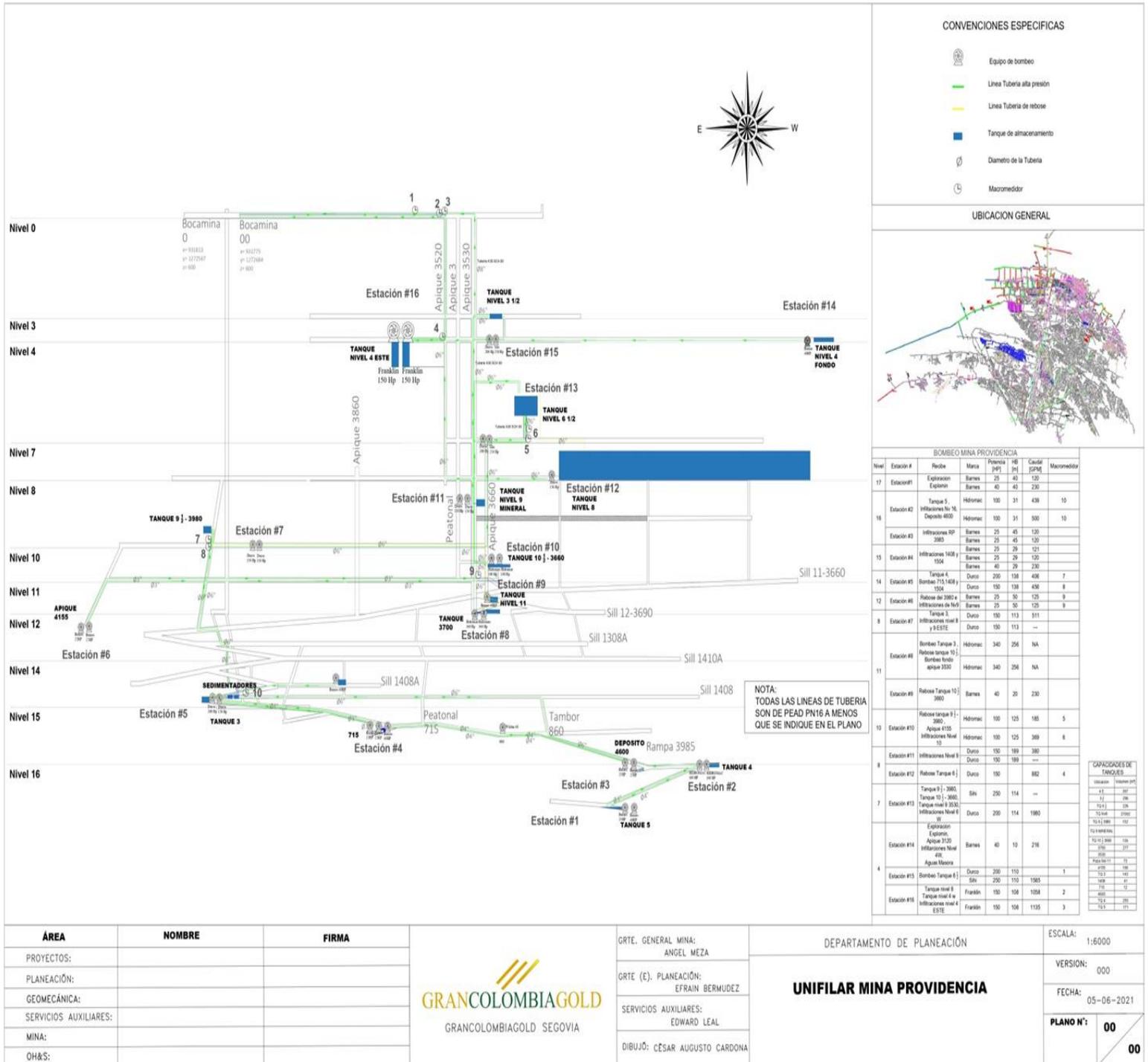


Ilustración 22 :Unifilar mina Providencia Actual

UNIFILAR BOMBEO MINA CARLA ACTUAL

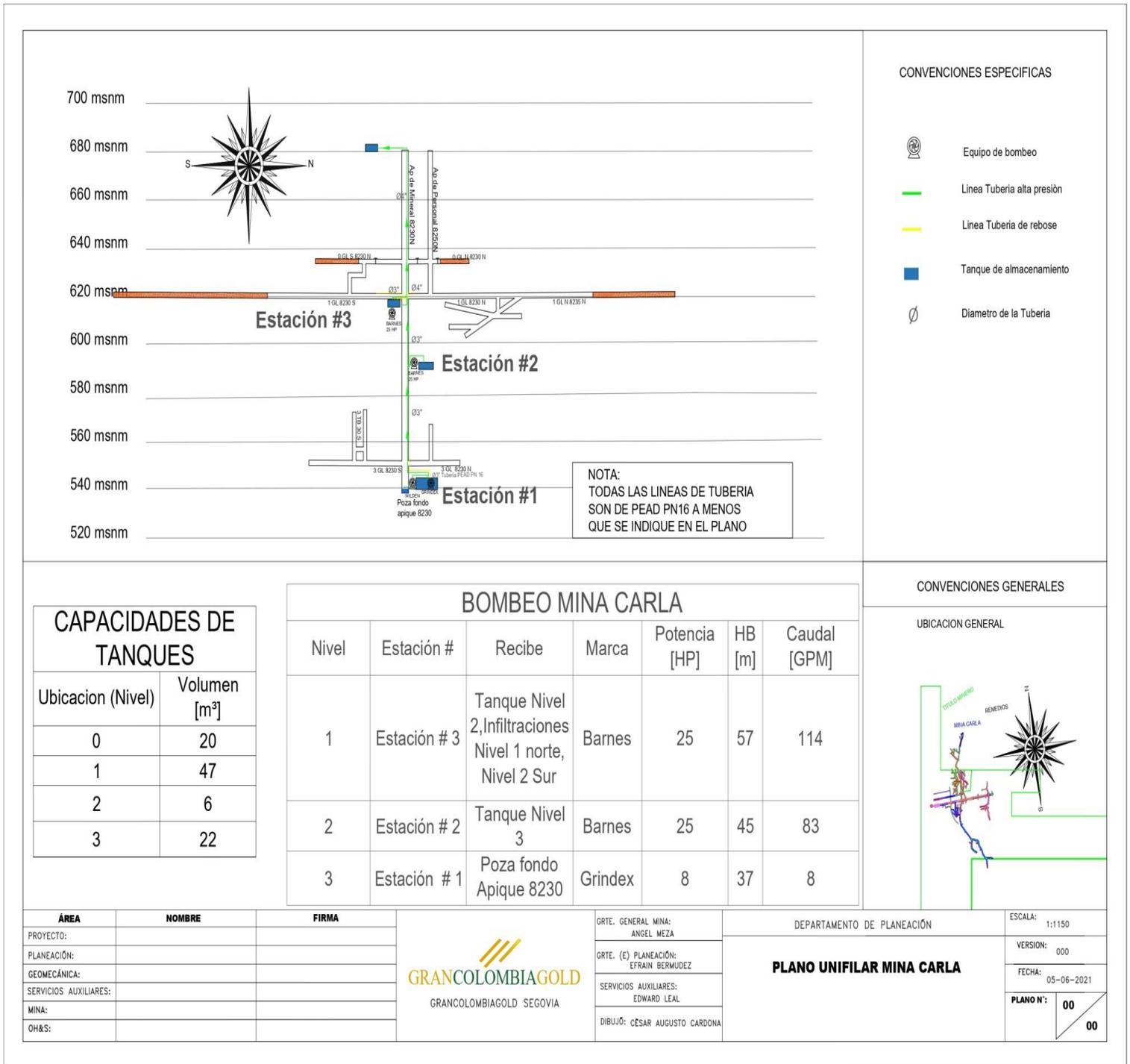


Ilustración 23: Unifilar mina Carla Actual

- Se ilustra en planos unifilares los proyectos a mediano plazo en minas para optimizar el sistema hidráulico de estas.

UNIFILAR PROYECTADO MINA PROVIDENCIA

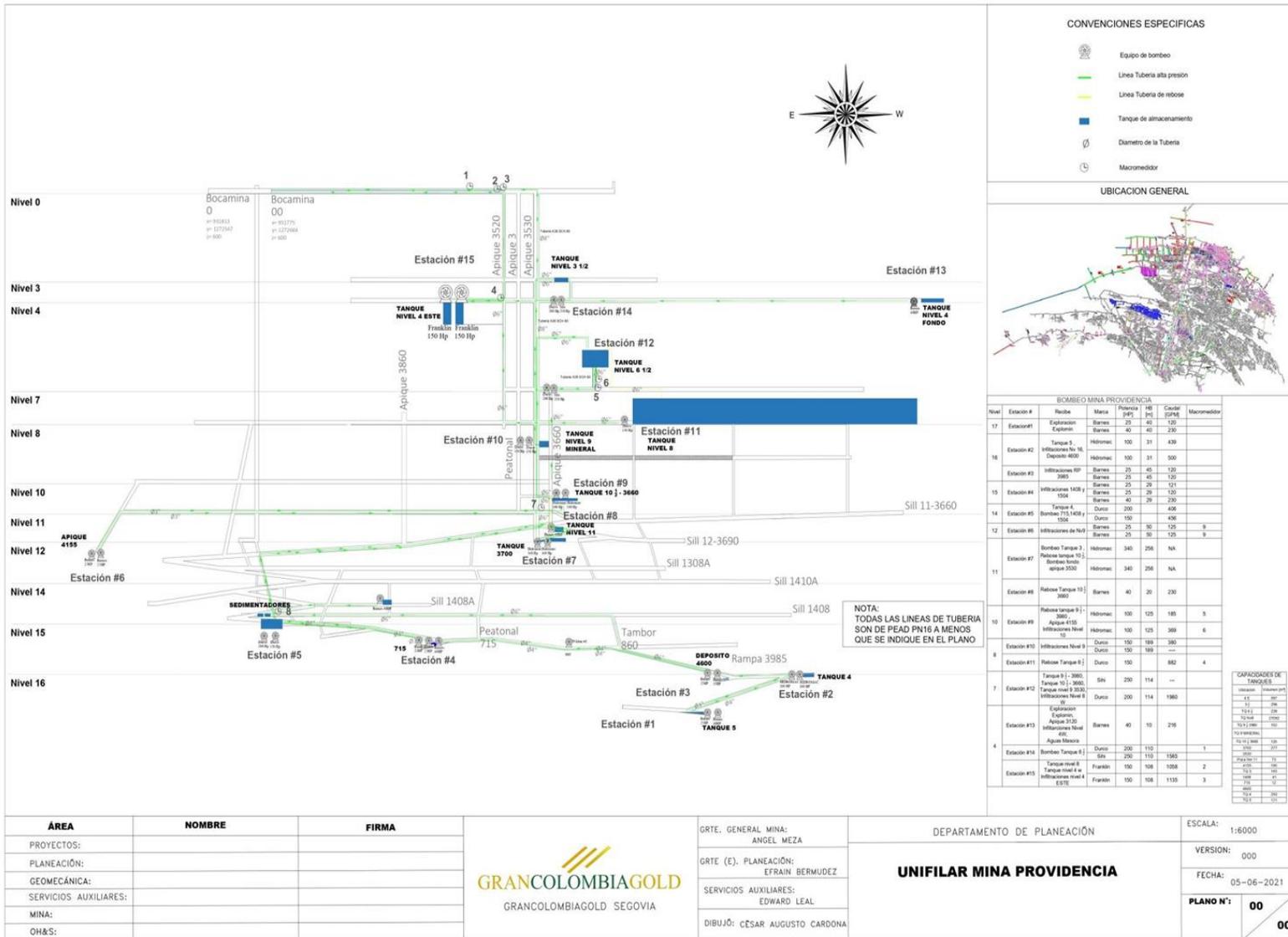


Ilustración 24: Unifilar mina Providencia Projectado

UNIFILAR PROYECTADO MINA SANDRA

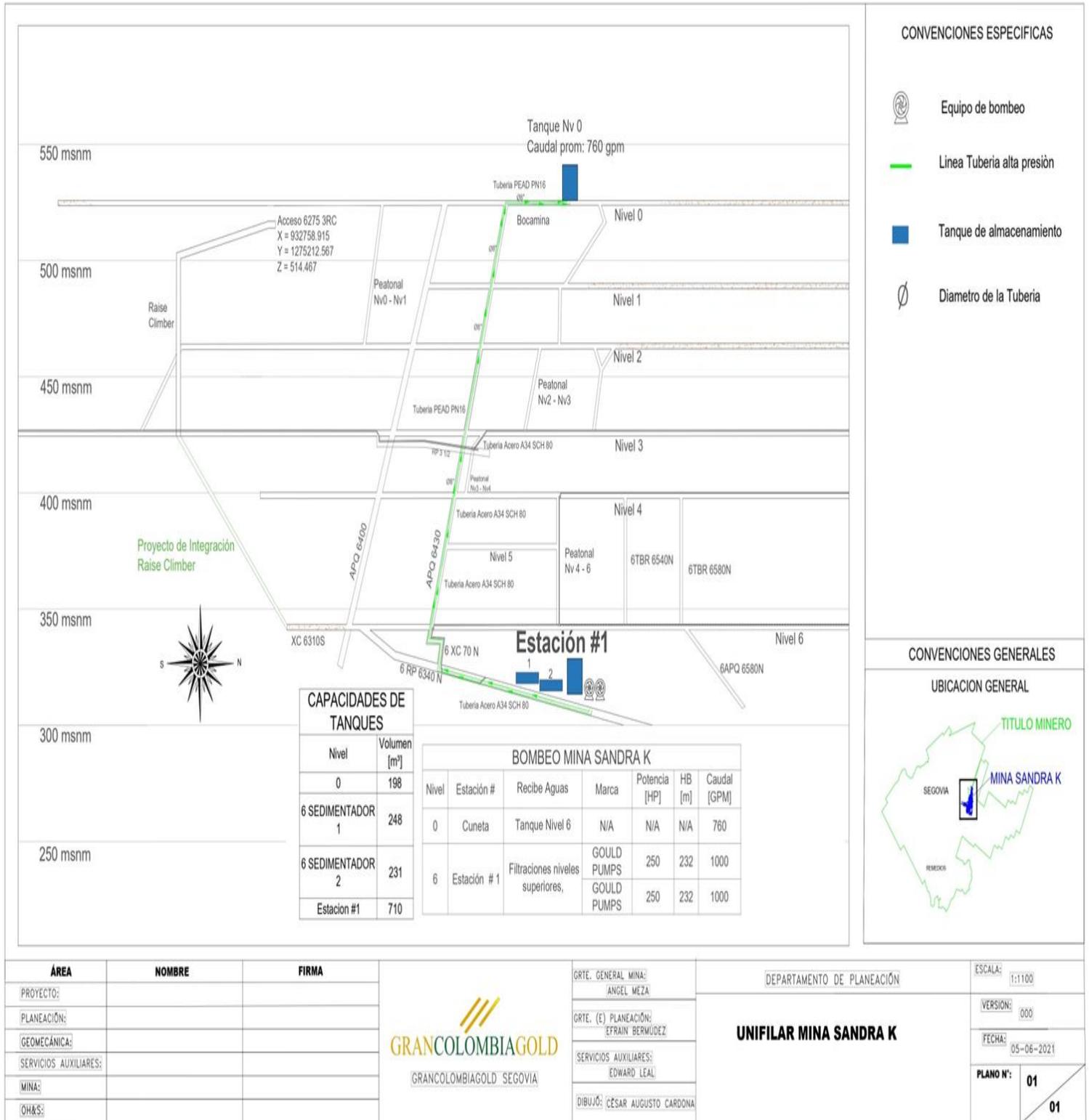


Ilustración 25: Unifilar mina Sandra K Proyectoado

-
- Se brinda apoyo en el levantamiento de salas de aire comprimido de mina Providencia y mina El Silencio que recientemente hace parte del equipo de servicios auxiliares mina, se caracterizan equipos, redes de tuberías y nuevos diseños para mejorar este sistema. (se amplía la información en detalle en ANEXOS)

VII. CONCLUSIONES

- Se observa un cambio de perspectiva de la compañía en cuanto a los sistemas hidráulicos y los servicios auxiliares de mina como tal (aire comprimido, bombeo) que antes se aplicaban de forma muy empírica y ya se abordan desde la planeación y la ingeniería, es por esto que se debe comenzar con la recopilación de inventarios y supremamente importante, las mediciones de las variables importantes que intervienen en los procesos, dado que con el análisis de estos datos a través del tiempo se toman decisiones de ingeniería para ir ajustando el sistema en un punto de operación óptimo y eficiente.
- Se deben implementar las estrategias necesarias con miras a la automatización como la caracterización de los equipos, capacidades, consumos, curvas de operación y rendimiento, dando la importancia a la estandarización de los procesos en las 4 minas donde se desarrolla la operación, con esto se busca una mejora en los tiempos de mantenimiento y control de equipos, disminuyendo el número de operarios en estaciones de bombeo, haciendo más segura la operación minera.
- Se realiza un trabajo interesante con los sistemas de aire comprimido, caracterizando los equipos, definiendo las rutas, elaborando informes sobre el estado actual de estos, y ejecutando mejoras y un plan de acción frente a las dificultades que se presentan en la actualidad

REFERENCIAS

- [1] E. Blanco, S. Veladre, and J. Fernandez, “Manual de optimización de sistemas de bombeo,” p. 183, 2018, [Online]. Available: https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/EEIColombia/Manual_sistemas_bombeo.pdf.
- [2] R. L. Moot and J. A. Untener, “Mecánica de Fluidos: Dinámica de Fluidos,” *StuDocu*, p. 2, 2017, [Online]. Available: [https://www.studocu.com/pe/document/universidad-nacional-federico-villarreal/mecanica-de-fluidos-i/resumen-mecanica-de-fluidos-hidrodinamica/3500368%0Ahttps://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10195/Dinamica de fluidos ideales.pdf?sequence=1&](https://www.studocu.com/pe/document/universidad-nacional-federico-villarreal/mecanica-de-fluidos-i/resumen-mecanica-de-fluidos-hidrodinamica/3500368%0Ahttps://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10195/Dinamica%20de%20fluidos%20ideales.pdf?sequence=1&).
- [3] F. White, *Mecanica de fluidos 5ta E.* 2006.
- [4] Ventsim, “Pumpsim.” .

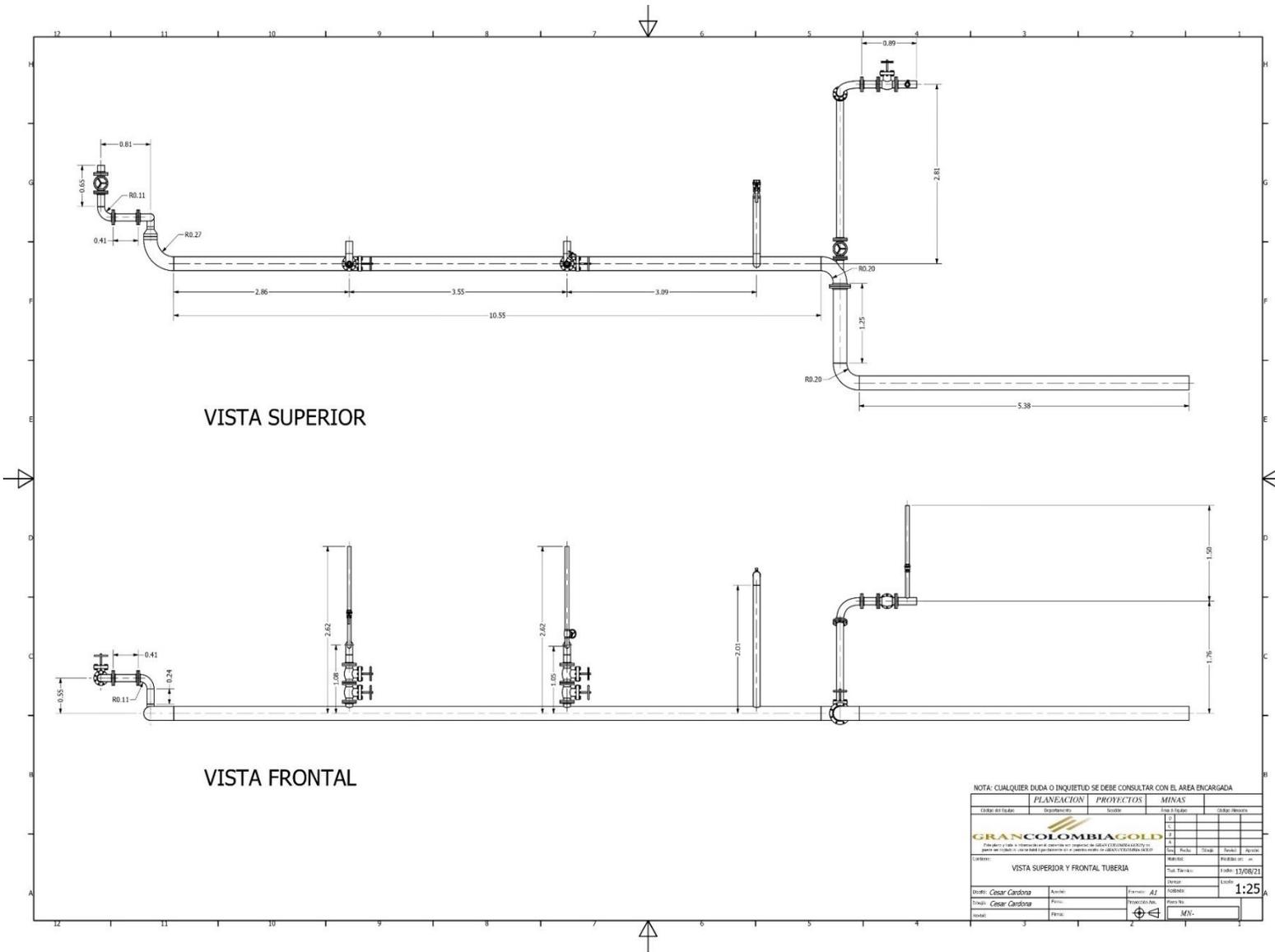


Ilustración 27 :Detalle tubería aire comprimido Sala de compresores mina Providencia

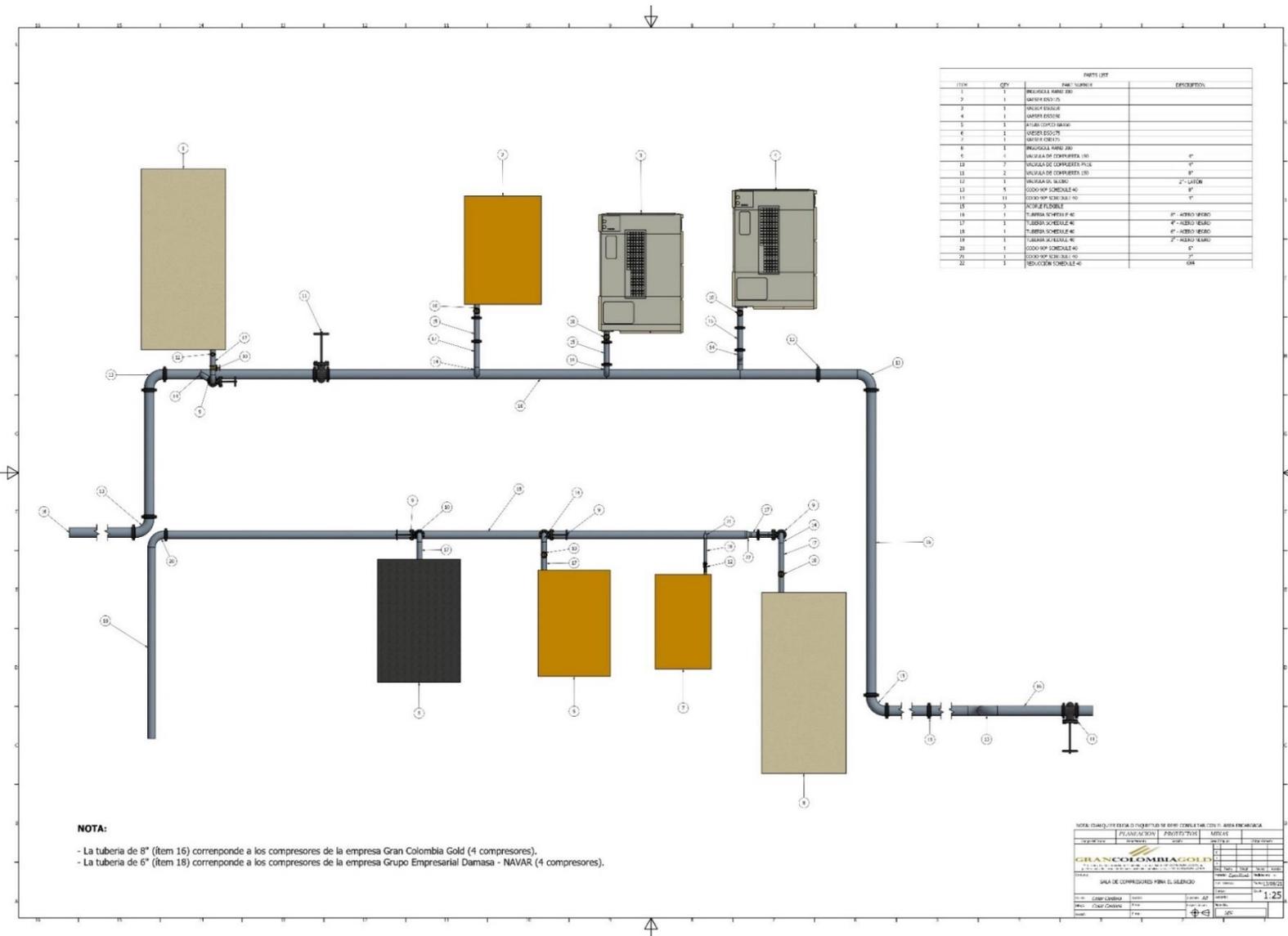


Ilustración 29: Levantamiento de detalle Sala compresores mina El Silencio

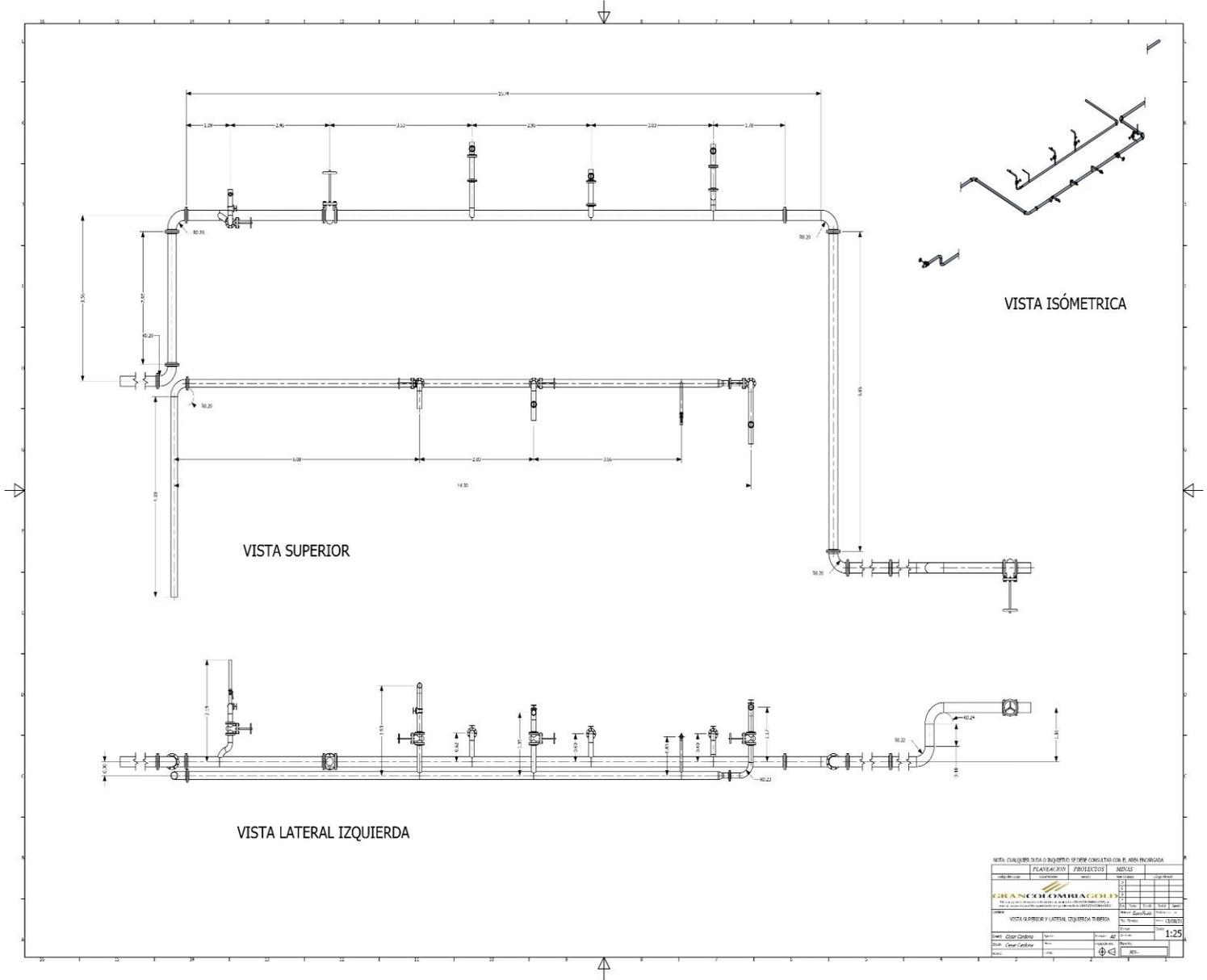


Ilustración 30:Detalle tubería sala de compresores mina El Silencio