UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO – CHILE

"ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DEL MEJORAMIENTO DE DESEMPEÑO Y MANTENIBILIDAD DEL SISTEMA HIDRÁULICO EN PISCINAS DE LIXIVIACIÓN ÁREA HÚMEDA, COMPAÑÍA MINERA ZALDÍVAR"

OMAR ALEJANDRO ARACENA ARANCIBIA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: Ph.D. CHRISTOPHER COOPER VILLAGRÁN

PROFESOR CORREFERENTE: ING. RENÉ VALDENEGRO OYANEDER

NOVIEMBRE - 2018

DEDICATORIA

A mi familia: Rosa, Omar, Carolina, Javier y Denis, por su amor incondicional y apoyo en los momentos más difíciles.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a cada una de las personas que aportó con la realización de esta memoria de título dentro de la compañía como fuera de ella, principalmente al equipo de Confiabilidad de Mantenimiento y Operaciones Área Húmeda. Agradecer de forma especial a Gonzalo Cruz, Supervisor de Turno Lixiviación; Daniel Jerez, Superintendente de Confiablidad y Mejoramiento; Karina Salinas, Supervisor Servicios Cátodos; Juan Muñoz, Ingeniero Senior Área Húmeda, Leonardo Esquivel, Operador de Lixiviación; Felipe Bravo, Ingeniero de Confiabilidad Área Húmeda; Rodrigo Tapia, Planificador Área Húmeda; Compañeros de práctica y memoria de las distintas Áreas, compañeros de Área de Confiabilidad y Planificación, a todos los seudo futbolistas de las pichangas del día Miércoles y a todos aquellos que hicieron los días en faena más agradable.

Agradecer de forma especial a los amigos que hice durante mis años de Universidad, en especial a mis grandes amigos Javier Pino, Gustavo Villalobos, Fabian Ampuero, Cristian Zúñiga y a los del 1502.

RESUMEN

Este estudio se desarrolla en el Área de Confiabilidad y Mejoramiento de Minera Zaldívar, específicamente en el Área Húmeda de la compañía cuyo proceso principal es la obtención de cátodos de cobre fino a través del proceso de lixiviación de óxidos y sulfuros secundarios de cobre, particularmente en el sistema de irrigación por goteo de dos tipos de solución (IPLS y REFINO) a la pila dinámica y los sistemas de traspaso de solución inter-piscinas (Refino Inferior a Superior; Refino Superior a Piscina Dump Leach o DL).

La finalidad es determinar la capacidad hidráulica actual de estos dos tipos de sistema.

Los resultados obtenidos por sistema se muestran a continuación:

i. Transporte solución de REFINO desde piscina refino inferior a superior.

El sistema se encuentra correctamente balanceado, los caudales solicitados son capaces de ser satisfechos con el sistema actual.

ii. Transporte solución de REFINO desde piscina refino superior a piscina DL.

El sistema se encuentra correctamente balanceado, los caudales solicitados son capaces de ser satisfechos con el sistema actual.

iii. Irrigación Pila Dinámica con solución IPLS.

El sistema actual no es capaz de entregar los caudales necesarios debido a la limitación de presión total dinámica del sistema en paralelo debido principalmente a la diferencia de altura entre la piscina de IPLS y el lado sur de la pila dinámica, se recomienda cambio de impulsor en una de sus bombas desde 24.125” a 25”. Esta modificación genera una mejora en presión total dinámica disponible y caudal, además de una baja menor del rendimiento en caso de poner fuera de servicio por actividades de mantenimiento con respecto a la configuración actual.

iv. Irrigación Pila Dinámica con solución de REFINO desde piscina refino superior.

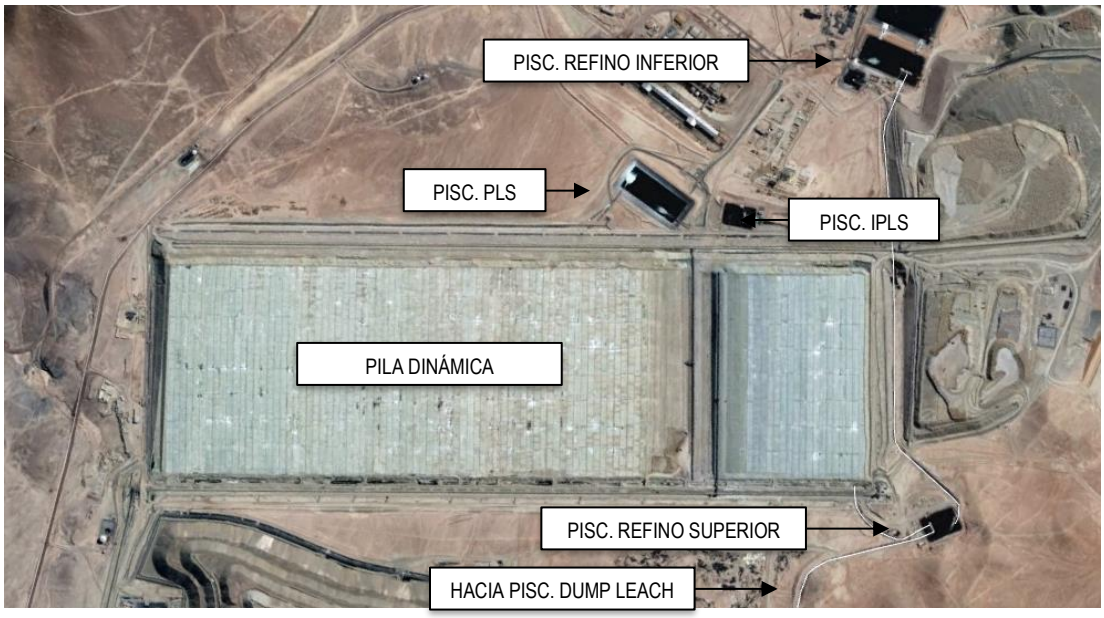
El sistema se encuentra balanceado y sobre-dimensionado en cuanto a presión dinámica mas no en caudal por lo que se hace necesario regular de forma manual la presión y por ende caudal entregado por este sistema.

Para ambos sistemas de irrigación de solución IPLS y REFINO se recomienda la instalación de válvulas reguladoras de presión sobre la pila que uniformen las presiones de cada peine. Esta modificación impactaría en las razones de lixiviación y en % de recuperación por paño de la curva cinética metalúrgica.

ABSTRACT

This analysis is developed in “Confiabilidad y Mejoramiento” area of Zaldívar Mining Company, particularly in “Area Húmeda” of the company which main process is to obtain copper cathodes through leaching process from oxides copper and secondary copper sulphides, specifically on the drip irrigation system of two kind of solvent (IPLS and REFINO) to the dynamic heap leaching and the carriage of raffinate solvent from one pond to another (Refino Inferior a Superior and Refino Superior to Dump Leach or DL pound).

The goal is to determinate the actual hydraulic capacity of this kind of systems.



The results obtained are shown below:

i. **Carriage of raffinate solvent from *refino superior* pond to *refino inferior* pond.**

This system is correctly balanced, it is capable to supply raffinate solution at the correct flow rate and total dynamic head pressure.

ii. Carriage of raffinate solvent from refino superior pond to *dump leach* pond.

This system is correctly balanced, it is capable of supply raffinate solution at the correct flow rate and total dynamic head pressure.

iii. Irrigation of dynamic heap leaching with IPLS solvent from IPLS pond.

This system is not able to supply the right flow rates, since it is limited on the total dynamic head pressure available, mainly because of height difference between IPLS pond and the dynamic heap's south side. It is highly recommended to change one of the impellers, from 24.125" to 27" in order to gain dynamic pressure and in case of take it out of service for maintenance tasks, to have a lower performance lose.

iv. Irrigation of dynamic heap with raffinate solvent from *refino superior* pond.

This system is correctly balanced and oversized in total dynamic head pressure, but not in flow rate. Because of this it is necessary to regulate manually pressure and flow rate.

For both irrigation systems it is recommend installing regulator pressure valves to standardize initial pressure at the beginning of every *peine*. This regulation would impact on leaching rates and thus on recuperation percentage for every *paño* in the kinetic metallurgical curve.

GLOSARIO

i. msnm: metro(s) sobre el nivel del mar
ii. gpl: gramo(s) por litro
iii. PLS: Pregnant leaching solution – solución de lixiviación cargada.
iv. IPLS: Intermediate Pregnant Leaching Solución – Solución de lixiviación intermedia.
v. Tph: toneladas por hora (ton/hr)
vi. cSt: Centi-Stoke, unidad de medida de la viscosidad cinemática 1cSt = 1 mm^2/s
vii. lph: Unidad de medida de Caudal, litros por hora.
viii. mca: metros columna de agua. unidad de medida de presión equivalente a 0,1 bar ó 1.47 psi.
ix. mcRef: metros columna de refino

1 ÍNDICE

RESUMEN ..... **IV**

ABSTRACT ..... **VI**

GLOSARIO ..... **VIII**

1 ÍNDICE **1**

2 INTRODUCCIÓN **8**

2.1 Objetivo General 10

2.2 Objetivos Específicos 10

3 ANTECEDENTES **11**

3.1 Minería de cobre en Chile 11

3.2 Descripción de la empresa 12

3.2.1 Historia 12

3.2.2 Ubicación 13

3.3 Proceso productivo 13

3.3.1 Tronadura y extracción 14

3.3.2 Chancado Primario 15

3.3.3 Chancado Secundario 16

3.3.4 Acopio 17

3.3.5 Chancado Terciario 17

3.3.6 Lixiviación en Pilas 18

3.3.7 Extracción por Solvente o SX 18

3.3.8 Electro depositación o *Electro Winning* (EW) 19

3.3.9 Stripping o Despegado 19

4 MARCO TEÓRICO 22

4.1 Propiedades de los fluidos 22

4.1.1 Densidad y gravedad específica 22

4.1.2 Presión de saturación, Presión de vapor y cavitación 22

4.2 Flujo en Tuberías 23

4.2.1 Flujo laminar y turbulento 23

4.2.2 Número de Reynolds 24

4.2.3 Ecuación de continuidad 24

4.2.4 Ecuaciones de Bernoulli 25

4.2.5 Pérdidas de carga Mayores 25

4.2.6 Pérdidas de carga menores 27

4.2.7 *Standard Dimension Ratio* (SDR) 27

4.3 Bombas 28

4.3.1 Tipos de Bombas 28

4.3.2 Bombas centrífugas 29

4.3.3 Bombas axiales 29

4.3.4 Parámetros fundamentales en bombas 30

4.4 Emisores 36

4.5 Diseño de sistema de riego basado en el método del vol. de control 37

4.5.1 Desarrollo del modelo 37

4.5.2 Cálculo de uniformidad 40

4.6 Aproximación solución sistema ecuaciones diferenciales ordinarias 41

4.6.1 Programación de proceso iterativo y validación 42

4.6.2 Validación 43

4.6.3 Programa para determinación parámetros peines 43
4.7 Metalurgia 44
4.8 Mantenimiento 48
4.8.1 Conceptos Básicos 48
4.8.2 Mantenibilidad 48
4.8.3 Análisis de Criticidad 49
5 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE LIXIVIACIÒN Y DISPOSICIÓN DE EQUIPOS 54
5.1 General 54
5.2 Construcción de las pilas y apilamiento 56
5.3 Riego Pila Dinámica 58
5.3.1 Primera etapa, IPLS: 59
5.3.2 Segunda etapa, Refino: 63
5.3.3 Configuración del sistema de riego 65
5.4 Riego Pila *Dump Leach* 67
5.5 Riego Pila de Ripios 69
5.6 Recolección de Soluciones 70
5.7 Extracción por solvente y Electro-obtención 73
5.8 Bombas y motores 74
5.8.1 Motores 74
5.8.2 Bombas 75
5.8.3 Desempeño 79
5.9 Goteros 81
5.10 Geometría pila dinámica 83

6 ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL SISTEMA Y FUNCIONAMIENTO ACTUAL 85

6.1 Definición del sistema para método volumen de control 85

6.2 Definición de parámetros del sistema 88

6.3 IPLS - Pila Dinámica 91

6.3.1 Situación Actual 91

6.3.2 Sistema ideal 96

6.4 Refino Superior – Pila HL 98

6.4.1 Situación Actual 98

6.4.2 Sistema Ideal 101

6.5 Refino Superior – Piscina DL 102

6.6 Piscina Refino Inferior a Piscina Refino Superior 109

7 POSIBILIDADES DE MEJORA DESEMPEÑO 115

7.1 IPLS – Pila Dinámica 115

7.2 Sistema de irrigación sobre la pila 116

7.3 Costos 118

8 MANTENIMIENTO 121

8.1 Problema 121

8.2 Análisis de Criticidad 121

8.3 Impacto de mantenimiento programado 129

8.4 Estrategia de mantenimiento actual 132

8.5 Historial de fallas 133

8.6 Plan de cambio por condición 135

9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 136

10 REFERENCIAS **138**

11 ANEXOS **140**

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Martillos de piedra y madera de Chuquicamata, cultura Atacameña 11

Figura 3.2. Ubicación Compañía Minera Zaldívar 13

Figura 3.3. Carguío de material a pilas según ley del material 15

Figura 3.4. Pilas Dinámica, Dump Leach y Botadero 15

Figura 3.5. *Apron Feeder* y tolva alimentación chancado primario 16

Figura 3.6. Domo Stock Pile 17

Figura 3.7. Disposición placas en celda EW 19

Figura 3.8. Área Húmeda SX y EW 21

Figura 4.1. Comportamiento de un fluido donde se observan: **a**. flujo turbulento **b.** flujo en transición y **c.** flujo laminar 23

Figura 4.2. Bombas de tipo: a) flujo centrífugo b) flujo mixto c) flujo axial 28

Figura 4.3. Vista en isométrica de una bomba centrífuga típica 29

Figura 4.4. Curva de desempeño para familia de bombas Hazleton 14KL VNDM ... 32

Figura 4.5. a) bombas en serie b) Bombas en paralelo 33

Figura 4.6. Curva de rendimiento de tres bombas en serie 34

Figura 4.7. Curva de rendimiento para tres bombas en paralelo 35

Figura 4.8. a) aspersor tipo gotero b) aspersor tipo aspersor 36

Figura 4.9. Volumen de control elemental 37

Figura 4.10. Formato Excel para resolución de sistema de ecuaciones 42

Figura 4.11, Elemento de volumen diferencial 44

Figura 4.12. Factores que afectan la mantenibilidad 49

Figura 4.13. Diagrama de flujo de criticidad 50

Figura 4.14. Matriz de Criticidad de activos 53

Figura 5.1. Diagrama de Flujo proceso de Lixiviación 55

Figura 5.2. Pila Dinámica 56

Figura 5.3. Proceso de curado traspaso CT-32 - CT-34 56

Figura 5.4. Apilamiento en pila dinámica Tripper 201 57

Figura 5.5. Pila Dinámica, RAL y DL. 58

Figura 5.6. Sistema de bombeo IPLS y Refino a Pila Dinámica 59

Figura 5.7. Bombas Hazleton en piscina de refino superior 59

Figura 5.8. Bombas piscina IPLS 60

Figura 5.9. Cañerías de irrigación IPLS a pila HL 61

Figura 5.10. Cuadro de válvulas solución IPLS 62

Figura 5.11. Líneas desde piscina de Refino Superior 64

Figura 5.12. Ingreso líneas 1171 y 1172 al costado de la pila 65

Figura 5.13. Cañerías de Irrigación hacia la pila 66

Figura 5.14. Unión efe a línea que va sobre la pila 66

Figura 5.15. Configuración sistema de riego sobre pila dinámica 67

Figura 5.16. Diagrama de flujo riego pila DL 68

Figura 5.17. Piscinas refino superior y DL y ubicación bombas *Booster* 69

Figura 5.18. Diagrama Riego Piscina RAL 70

Figura 5.19. Obtención solución PLS – IPLS 71

Figura 5.20. Piscina RAL y línea hacia piscina Auxiliar 72

Figura 5.21. Diagrama general obtención solución desde lixiviación pila RAL 72

Figura 5.22. Gotero Rivulis Plastro Hydromine 16/35 – 1.6 lph 81

Figura 5.23. Gráfico caudal v/s presión emisor Hydromine 16/35 – 1.6 lph 81

Figura 5.24. Pila dinámica o HL y vistas A-A y B-B 83

Figura 5.25. Vista A-A pila dinámica 84

Figura 5.26. Vista B-B pila dinámica 84

Figura 6.1. Diagrama Sistema riego pila dinámica 85

Figura 6.2. Diagrama impulsión refino desde piscina Refino Superior a DL 103

2 INTRODUCCIÓN

El negocio principal de Compañía Minera Zaldívar es la producción de cátodos de cobre de alta pureza a través del proceso de lixiviación en pilas de óxidos de cobre y sulfuros secundarios de cobre, cuyos principales procesos son de Extracción, Chancado, Apilado e Irrigación, Extracción por solvente y Electro-obtención.

Luego del apilado del material que contiene el cobre, se da paso a un proceso fundamental dentro de la línea de producción: la irrigación de solución sobre el mineral apilado, con el objetivo de extraer el contenido de cobre desde el material sólido para la obtención de los cátodos en etapas posteriores [1].

El proyecto inicial contemplaba la implementación de la lixiviación a través de pila estática con duración de aproximadamente 4 años por piso, pero años más tarde el proceso se modificó para realizarlo a través de pila dinámica y junto con esto incorporar el proceso de lixiviación de ripios de alta ley con la consecuente creación de una nueva pila denominada RAL (Ripios de Alta Ley). Además, durante los años de operación se creó la piscina *Dump Leach* para la irrigación de la pila de sulfuros o mineral de baja ley, se han cambiado los tipos de gotero, se modificó la configuración de los manifolds, se cambiaron los diámetros de impulsor, se utilizaron bombas para otros fines y sistemas y un conjunto de modificaciones que no consideraba el proyecto inicial [2].

Como consecuencia de esta serie de modificaciones que han sido ejecutadas durante los 23 años de operación que suma la compañía, se desconoce la capacidad actual de los sistemas, afectando así la generación e implementación de una estrategia de mantenimiento sobre estos equipos debido al desconocimiento del impacto que genera la salida de servicio de estos equipos.

Es por esto que se hace necesario evaluar la capacidad del sistema actual de bombeo en lixiviación con el fin de determinar posibles desviaciones, condiciones actuales, visualizar oportunidades de progreso y mejoras en el desempeño que signifiquen

además un impacto en el control de los factores que afectan a la mantenibilidad de los sistemas y así mismo en los indicadores de mantenimiento.

2.1 Objetivo General

El objetivo de este trabajo de investigación es realizar un análisis técnico del desempeño actual del sistema de bombeo de las piscinas de lixiviación en el Área Húmeda de la compañía para determinar las desviaciones respecto a los parámetros de diseño. Proponer posibles mejoras al sistema junto con su análisis económico, que ayuden a aumentar el desempeño del sistema y así la mantenibilidad de los activos.

2.2 Objetivos Específicos

i. Analizar el Contexto Operacional.

ii. Identificar los parámetros de funcionamiento actual de los equipos de Área Húmeda; establecer desviaciones existentes según los parámetros esperados por la compañía.

iii. Jerarquizar de la criticidad de los puntos deficientes en dónde se formen los cuellos de botella.

iv. Proponer posibilidades de mejora para alcanzar los parámetros de funcionamiento de equipo/sistema y eliminar los cuellos de botella existentes.

v. Proponer posibilidad de mejora en mantenibilidad de los sistemas.

vi. Realizar evaluación económica de la implementación de las mejoras.

vii. Recomendaciones y conclusiones.

3 ANTECEDENTES

Este capítulo entrega una idea global del contexto en el cual se desarrolla la actividad de la Compañía Minera Zaldívar.

3.1 Minería de cobre en Chile [4]

La extracción de mineral de cobre se remonta a la época precolombina donde los Atacameños, provistos de herramientas de madera y piedra semi-talladas excavaban piques en los faldeos del cerro para obtener "charqui de cobre" o "cobre nativo" que fundían para elaborar objetos decorativos (ver Figura 3.1).

Figura 3.1. Martillos de piedra y madera de Chuquicamata, cultura Atacameña

No fue hasta muy entrado el siglo XX cuando el cobre, hasta ese momento relegado por la minería del salitre, empieza a tener la importancia económica relativa del salitre llegando ser a mediados del mismo siglo uno de los principales productos de exportación, con la extracción de gran número de pequeños yacimientos de muy buenas leyes.

El verdadero *boom* de la industria del cobre estuvo determinado por un brusco aumento de la demanda mundial, debido principalmente a la aparición de la industria eléctrica. En este contexto se invirtieron más de 200 millones de dólares en la faena El Teniente y Chuquicamata (minas que habían sido trabajadas desde el período prehispánico a

pequeña escala), dando inicio al nacimiento de la industria de la **Gran Minería del Cobre.**

La situación actual de la minería del cobre en Chile se presenta al alza, con un precio proyectado para el año 2018 de 3,14 USD/libra, que significa un aumento del +11% respecto del año anterior en conjunto con un alza en la producción total nacional de un +4,3% respecto del año 2017, número positivos considerando que la producción nacional en los últimos dos años había entregado números negativos (-3,8 y -0,8% respectivamente).

3.2 Descripción de la empresa [1]

3.2.1 Historia

Compañía minera Zaldívar es una empresa que se dedica a la extracción de cobre fino a través del proceso de lixiviación de óxidos de cobre (98% de la producción) y del proceso de flotación de sulfuros de cobre (2% de la producción), cuyo yacimiento de cobre fue descubierto en el año 1979 en las faldas del cerro Zaldívar, nombrado así por Don Adolfo Zaldívar Reyes (1875-1936). Después de 14 años de estudios y análisis desde el descubrimiento del yacimiento, dos empresas: la finlandesa Outokumpu y la canadiense Placer Dome decidieron construir un complejo minero con la capacidad de producir inicialmente entre 70.000 y 130.000 toneladas métricas anuales de cátodos de cobre de alta pureza durante un periodo de 20 años. El 7 de Junio de 1995 se produce el primer cátodo de cobre cuyo destino inicial fue la ciudad de Kobe, Japón.

En Diciembre de 2006 la corporación canadiense Barrick Gold, se convirtió en propietaria de Minera Zaldívar operando durante nueve años. Es en ese momento cuando en Diciembre de 2015, el grupo minero Antofagasta Minerals con la compra del 50% de la propiedad, pasa a operar la compañía Minera Zaldívar SpA.

Actualmente la compañía extrae aproximadamente ciento tres mil toneladas de cobre fino y tiene más de dos mil trabajadores propios y colaboradores en faena.

3.2.2 Ubicación

El yacimiento de minera Zaldívar se encuentra ubicado en la precordillera andina de la Región de Antofagasta, Chile. Se encuentra a una altitud de 3.300 msnm a una distancia de 190 kilómetros al sudeste de la ciudad de Antofagasta y a unos 1.400 kilómetros al norte de la ciudad de Santiago.

Figura 3.2. Ubicación Compañía Minera Zaldívar

3.3 Proceso productivo [3]

La planta posee una capacidad de diseño de producción de 150.000 toneladas de cátodos de cobre por año a través del procesamiento de óxidos de cobre mediante lixiviación, que se define como un proceso hidrometalúrgico a través del cual se

provoca la disolución de un elemento desde el mineral que lo contiene para ser recuperado en procesos posteriores mediante electrólisis.

La producción de compañía minera Zaldívar para el año 2017 fue de 103.400 toneladas de cátodos de cobre con un costo promedio de 1,62 dólares la libra producida, 5,2% mayor que el año anterior debido principalmente a la negociación colectiva que se realizó el 2017 y un incremento en los precios de materias primas necesarias para el proceso (Antofagasta PLC, *Preliminary Results for the end of the year ended 2017*, 13 Marzo 2018).

Las etapas del proceso de lixiviación en pila son:

3.3.1 Tronadura y extracción

El proceso productivo se inicia con la tronadura del macizo rocoso con el fin de fragmentarlo para poder ser cargado y transportado a la planta y sus etapas del proceso posteriores, a través del proceso de tronadura, previa perforación e instalación de explosivos en el macizo. Una vez ejecutada la tronadura el material es cargado, a través de palas de 80 toneladas de capacidad, en camiones de 240 toneladas que dependiendo de la ley del material llevan el material (como se muestra en Figura 3.3) hacia:

a) Proceso de chancado: Mineral con un porcentaje mayor a 0,4% de cobre total se alimenta al proceso de chancado primario, secundario y terciario para ser apilado finalmente a la pila dinámica dónde se somete al proceso de lixiviación en pila.
b) Pila *dump leach*: El mineral de baja ley se transporta sin chancado a esta pila de tipo estática, ubicada en una cancha impermeable para ser lixiviado en capas sucesivas de 10 a 20 metros de altura.
c) Botadero: Mineral sin ley que es apilado sin recibir ningún tratamiento posterior.

La ubicación de estas dos pilas de lixiviación y botadero se muestra en Figura 3.4.

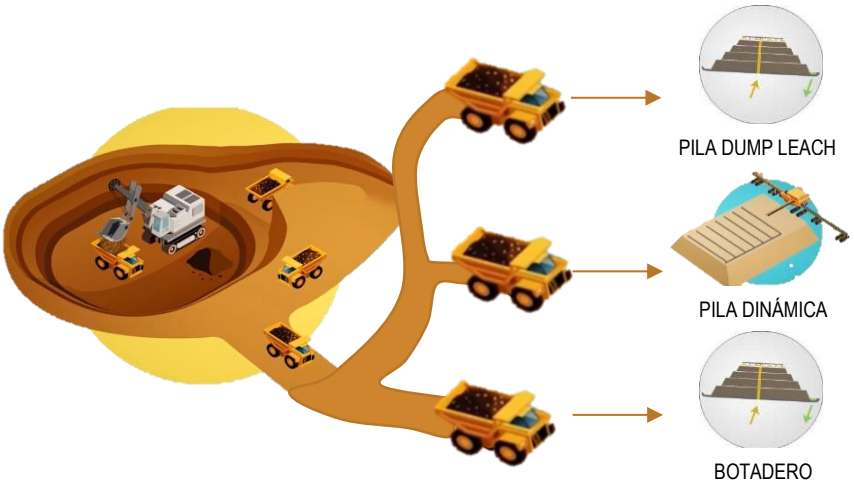


Figura 3.3. Carguío de material a pilas según ley del material

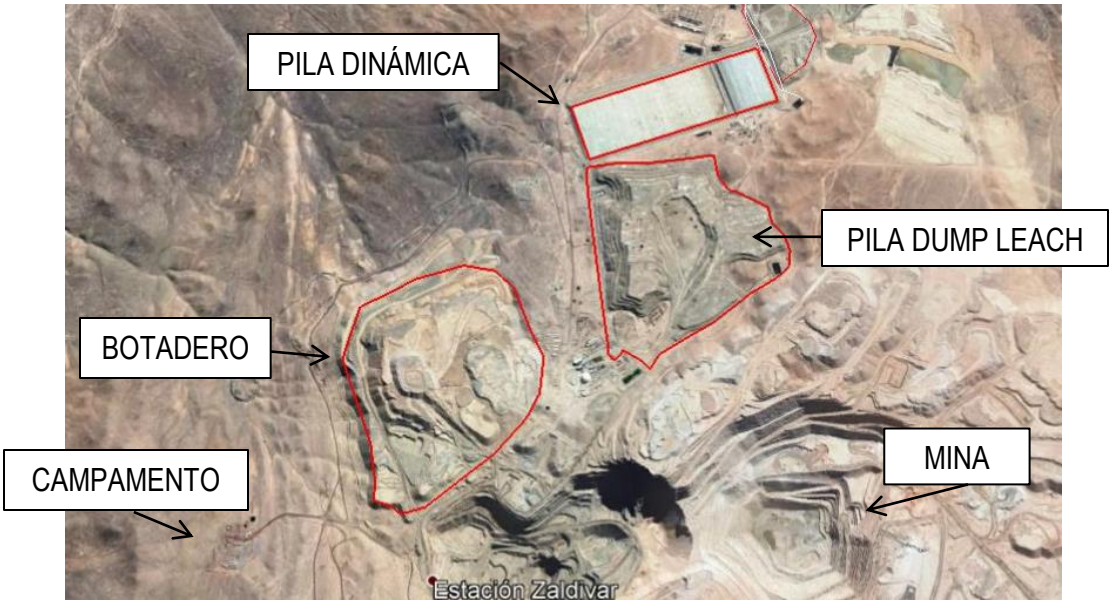


Figura 3.4. Pilas Dinámica, Dump Leach y Botadero

3.3.2 Chancado Primario

El mineral extraído y de concentración de cobre mayor al 0,4% se transporta en camiones la tolva de alimentación del *Apron feeder* o Alimentador de placas, cuyo

trabajo es entregar de forma controlada el material al chancador primario, a una tasa de aproximadamente 50.000 toneladas de mineral por día.

Figura 3.5. *Apron Feeder* y tolva alimentación chancado primario

Sobre el chancador primario se encuentra un martillo pica rocas que reduce el tamaño de aquellas que sean demasiado grandes evitando o eliminando cualquier atascamiento. La granulometría del material saliente es de unos 40 mm (variable según el *setting* de operaciones) y es depositado sobre una correa transportadora cubierta que transporta el material hacia la correa que alimenta al proceso de chancado secundario.

3.3.3 Chancado Secundario

El material proveniente del chancado primario es seleccionado a través de dos harneros (Harnero H013 y H014). Aquel material con granulometría menor a 37 mm es apilado directamente en la pila de acopio o *stock pile* y el superior a 37 mm es enviado al proceso de chancado secundario, donde dos (2) chancadores en paralelo modelo serie MP1000 marca *Metso* reducen su tamaño hasta 37 mm aproximadamente.

3.3.4 Acopio

El material proveniente del chancado primario y secundario es almacenado en una pila de acopio o *stock pile* de carga viva de 30.000 toneladas que se encuentra dentro de un domo, como se ve en Figura 3.6 para controlar la emisión de material particulado. La razón de contar con una pila de acopio en los procesos es para darle continuidad a un proceso intermitente como es la carga y descarga de camiones y así realizar la sinergia con las etapas posteriores que operan de forma continua (apilado, lixiviación, ripios, etc)

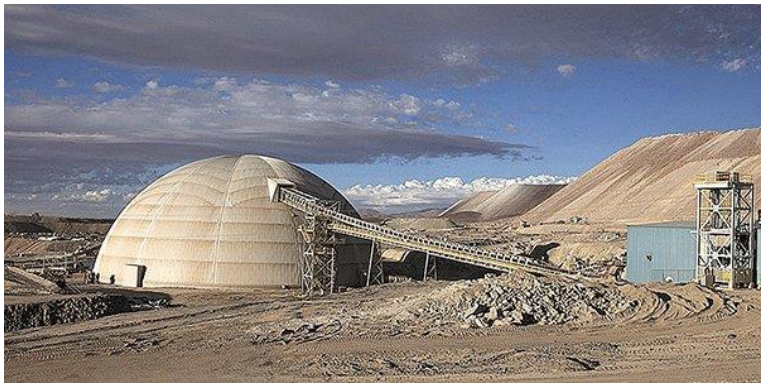


Figura 3.6. Domo Stock Pile

3.3.5 Chancado Terciario

El material almacenado en el *stock pile* es alimentado a través de 8 alimentadores a dos líneas de producción, 4 alimentadores por cada línea. Este material pasa por un proceso de pre-harneado (harneros banano) donde el material que tenga tamaño de partícula menor a 12 mm va directo al proceso de apilado en pila dinámica mientras que el mineral mayor a esta granulometría es almacenado en 2 silos de 150 toneladas de capacidad cada uno quienes alimentan a 2 líneas de chancado cada uno. Cada una de estas líneas cuenta con un chancador tipo *Water Flush* con una capacidad de diseño de 700 a 900 tph. Con un consumo de agua de aproximadamente 377 m^3 por hora.

La descarga de los chancadores terciarios alimentan la unidad de clasificación, que cuenta con harneros (4 harneros Allis), bombas de pulpas y ciclones para entregar dos productos, uno de ellos es la fracción gruesa que continua hacia la lixiviación en pilas y una fracción fina en pulpa que alimenta el proceso de obtención de concentrado a través de la planta de flotación.

3.3.6 Lixiviación en Pilas

El material proveniente del proceso de chancado es apilado a través de un apilador móvil o *tripper* para formar una pila dinámica de 2000 metros de largo y 640 metros de ancho aproximadamente. Esta pila se riega con solución IPLS o Refino a través de irrigación por goteros. La solución rica en cobre que ha percolado a través de la pila es captada y enviada a una piscina de PLS o IPLS según sea su concentración en gramos por litro de cobre. Para mayor detalle ver Capítulo 5.

3.3.7 Extracción por Solvente o SX

La solución rica en cobre almacenada en la piscina de PLS llega por gravedad a uno los cuatro trenes que componen la unidad de extracción por solvente, donde la solución PLS interactúa con un componente orgánico que extrae el cobre contenido en ella. Esta solución de PLS descargada recibe el nombre de REFINO y es enviada a la piscina de refino inferior. El componente orgánico cargado de cobre pasa por un proceso de lavado y separación, dando origen a un componente orgánico descargado (que regresa al estanque de orgánico en *tank farm*) y una solución **electrolito cargado**. Este electrolito se somete posteriormente a un proceso de filtrado, de retro-lavado y almacenado en un estanque de recirculación, desde dónde se alimenta a las naves de electro-obtención o *Electro Winning* (EW). Ver Figura 3.8.

3.3.8 Electro depositación o *Electro Winning* (EW)

El electrolito rico es bombeado hacia una de las noventa y dos (92) celdas de una las cuatro (4) naves de electro obtención y se hace circular a través de la celda durante unos 4 a 5 días que es el tiempo que se demora en generar un cátodo de 38 kilogramos. Cada celda está compuesta de ánodos laminados de calcio-plomo fijos y placas madres o placa inicial de acero inoxidable entre las cuales circula una corriente eléctrica (ver Figura 3.7). Producto de este proceso de electrólisis el cobre contenido en el electrolito empieza a electro-depositarse en las placas madres formando dos cátodos por cada placa madre. Ver Figura 3.8.

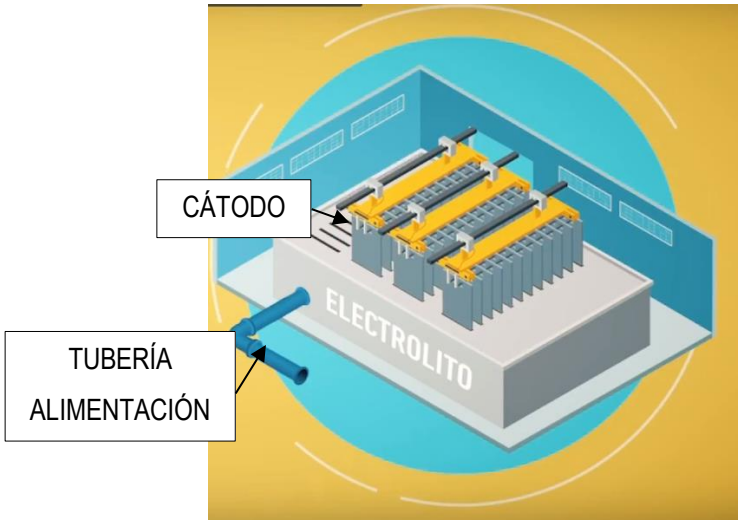


Figura 3.7. Disposición placas en celda EW

Cada celda contiene 60 cátodos y 61 ánodos separados por 100 (mm) aproximadamente.

3.3.9 Stripping o Despegado

Concurrido el tiempo de cosecha (4 a 5 días) un conjunto de 20 cátodos por celda es tomado por el puente grúa y depositado en la correa que alimenta la *stripping machine* o despegadora de cátodos donde una punzonadora da un golpe a la placa para soltar

ambos cátodos y una especie de espátula desciende a lo largo de la placa para separar los cátodos de la placa madre definitivamente, los transporta y apila formando paquetes de 2 toneladas aproximadamente. Estos paquetes son llevados al exterior de la nave electrolítica para entrega, despecho y transporte final por medio de trenes al puerto de la ciudad de Antofagasta o al puerto de Mejillones. La exportación es de aproximadamente 60% al mercado Chino, 30% al mercado Europeo y 10% al Brasileño.

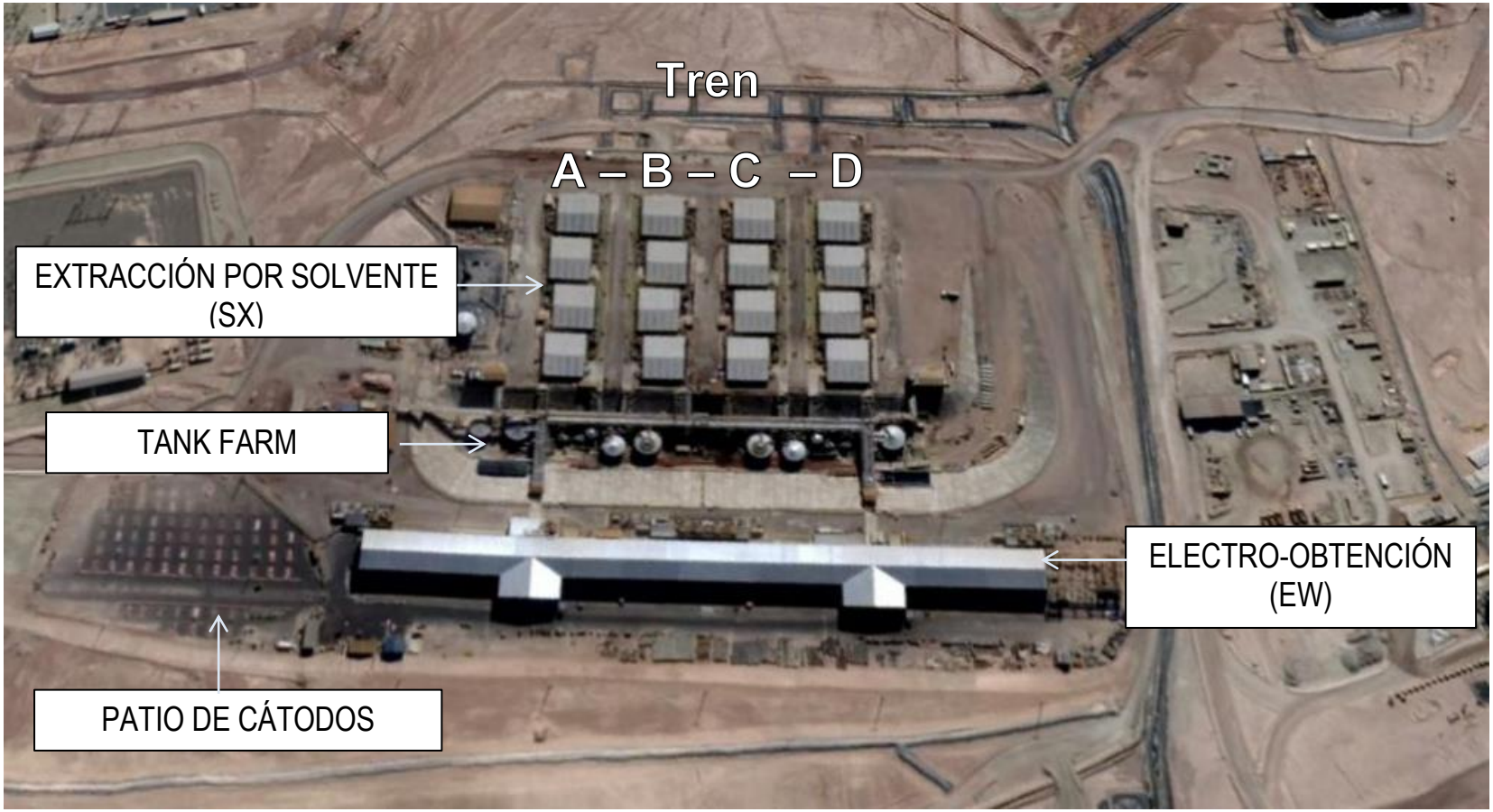


Figura 3.8. Área Húmeda SX y EW

4 MARCO TEÓRICO

4.1 Propiedades de los fluidos [5]

Este capítulo presenta las propiedades que se en analizan para caracterizar un fluido. Las propiedades pueden ser **intensivas** (independientes de la masa de un sistema como temperatura, presión y densidad) o **extensivas** (dependen del tamaño o extensión del sistema como la masa total, volumen total o cantidad de movimiento). Además, se encuentran las propiedades **específicas**, que son aquellas propiedades extensivas por unidad de masa (volumen específico y energía total específica).

4.1.1 Densidad y gravedad específica

La densidad se define como la masa por unidad de volumen. Es decir:

Densidad $$\rho = \frac{m}{V} \left[\frac{kg}{m^3}\right]$$ *(Ec. 1)*

Donde m: masa en (kg) y V: volumen en (m^3). En general que la densidad dependa de la temperatura y presión es condición notable en los gases, mientras que en líquidos y sólidos por su esencia incompresibles esta variación suele ser despreciable.

4.1.2 Presión de saturación, Presión de vapor y cavitación

La presión de saturación P_{sat} es la presión a la cual a una temperatura dada una sustancia pura cambia de fase (Ej: Agua a 1 atm a una T: 100°C). La presión de vapor P_V se define como la presión ejercida por su vapor en equilibrio de fases con su líquido a una temperatura dada. P_V es una propiedad de la sustancia pura y resulta ser idéntica a la presión de saturación ($P_{sat} = P_V$). La importancia de la presión de vapor es la posibilidad de caída de la presión del líquido, por debajo de la presión de vapor en algunos lugares

y la vaporización resultante no planeada. Las burbujas de vapor (llamadas burbujas de cavitación debido a que forman cavidades en el líquido) colapsan mientras son barridas hacia fuera de las regiones de baja presión, con lo que se generan ondas de alta presión extremadamente destructivas. Este fenómeno es **causa común de caída en el rendimiento**.

4.2 Flujo en Tuberías

4.2.1 Flujo laminar y turbulento [7]

El flujo en tuberías a bajas velocidades que forma líneas de corriente aproximadamente paralelas, suaves y de movimiento ordenado se conoce como **flujo laminar**. Para el caso en donde la velocidad aumenta sobre un valor crítico y este flujo empieza a ser caótico, con fluctuaciones de velocidad y movimiento desordenado es conocido como **flujo turbulento**. Existe también una zona de **transición** entre estos dos tipos de flujo (ver Figura 4.1).

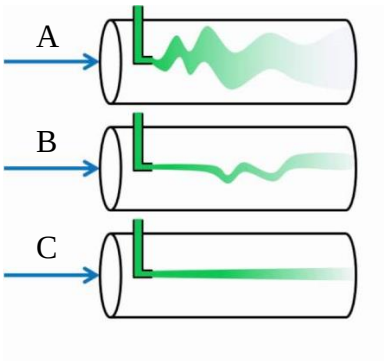


Figura 4.1. Comportamiento de un fluido donde se observan: **a**. flujo turbulento **b.** flujo en transición y **c.** flujo laminar

La mayoría de los flujos que se encuentran son turbulentos que gracias a las rápidas fluctuaciones mejora la transferencia de cantidad de movimiento entre las partículas

del fluido lo que disminuye la fuerza de fricción sobre la superficie y por tanto la potencia de bombeo necesaria para transportarlo.

4.2.2 Número de Reynolds

La transición de flujo laminar a turbulento depende de varios factores, durante 1880 Osborne Reynolds (1842 - 1912) descubrió que el régimen de flujo depende principalmente de la razón de fuerzas inerciales y fuerzas viscosas en el fluido, se define entonces el número de Reynolds como:

Número de Reynolds

$$\mathrm{Re} = \frac{Fuerzas\ inerciales}{Fuerzas\ viscosas} = \frac{V_{prom}D}{\upsilon} = \frac{\rho V_{prom}D}{\mu} \qquad \textit{(Ec. 2)}$$

Donde V_{prom}: velocidad de flujo promedio (m/s), D: longitud característica de la geometría y υ: viscosidad cinemática del fluido (m^2/s). En la mayoría de las condiciones prácticas, el flujo en una **tubería circular** según su número de Reynolds se puede definir como:

$Re \lesssim 2300$	flujo laminar
$2300 \lesssim Re \lesssim 4000$	flujo transicional
$Re \gtrsim 4000$	flujo turbulento

4.2.3 Ecuación de continuidad [8]

En un hilo de corriente donde:

i. No entra ni sale fluido a través de sus paredes
ii. Régimen permanente ya en estado estacionario

iii. No se crea ni se destruye masa, ni existe concentración ni dilución de masa en ninguna sección

Se cumple que:

Ecuación Continuidad

$$\rho_1 c_1 dA_1 = \rho_2 c_2 dA_2 = \rho_3 c_3 dA_3 = C \qquad \textit{(Ec. 3)}$$

Donde ρ: densidad (kg/m^3), c: velocidad del fluido (m/s), dA: elemento infinitesimal de área (m^2).

4.2.4 Ecuaciones de Bernoulli

Tiene que ver con la conservación de energía entre dos puntos, se define com:

$$\frac{P1}{\rho g} + \frac{\alpha {V_1}^2}{2g} + z_1 + h_{bomba} = \frac{P2}{\rho g} + \frac{\alpha {V_2}^2}{2g} + z_2 + h_{turb} + h_L \qquad \textit{(Ec. 4)}$$

Donde P: presión (Pa), V: velocidad (m/s), z: altura (m), h_{bomba}: altura de cabeza entrega por la bomba (m), h_{turb}: altura de cabeza consumida por una turbina (m), h_L: pérdidas por fricción y menores (m), ρ: densidad (kg/m^3), g: aceleración de gravedad (m/s^2).

4.2.5 Pérdidas de carga Mayores [5]

Cuando un fluido fluye a través de una tubería, la rugosidad propia de esta genera una pérdida de energía por fricción que es función del largo y diámetro de la tubería, la velocidad del fluido y el factor de fricción que a su vez es función del número de Reynolds. La pérdida de carga está definida como:

Pérdida de carga

$$h_L = \frac{\Delta P_L}{\rho g} = f \frac{L}{D} \frac{V_{prom}^2}{2g} \qquad \textit{(Ec. 5)}$$

Donde f: factor de fricción (-), L: largo de la tubería (m), D: diámetro de la tubería (m), Vprom: velocidad promedio del fluido (m/s), g: aceleración de gravedad (m/s^2).

Para el cálculo del factor de fricción es necesario determinar el tipo de flujo que se ha desarrollado dentro de la tubería, según sea laminar o turbulento el factor de fricción se puede calcular como:

Factor de fricción tubería circular, laminar

$$f = \frac{64}{Re} \qquad \textit{(Ec. 6)}$$

Factor de fricción tubería circular, turbulento

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0\ log\left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}}\right) \qquad \textit{(Ec. 7)}$$

La ecuación (Ec. 7) se conoce como **ecuación de *Colebrook***, en honor a Cyril F. Colebrook (1910-1997) quién desarrolló esta ecuación en el año 1939. Para encontrar el valor de f se debe realizar a través de un proceso iterativo. En 1983 S.E Haaland proporcionó una relación empírica que ahorra el proceso de iteración de Colebrook en dónde se define el factor de fricción f para flujo turbulento como:

Factor de fricción tubería circular, turbulento (Haaland)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \cong -1.8\ log\left[\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7}\right)^{1.11}\right] \qquad \textit{(Ec. 8)}$$

4.2.6 Pérdidas de carga menores

Cuando un fluido pasa a través de varias uniones, válvulas, flexiones, codos, ramificaciones en forma de letra T, entradas, salidas, ensanchamientos, etc. que interrumpen el flujo suave provocan pérdidas adicionales debido al fenómeno de separación y mezcla del flujo que se producen. En un sistema, generalmente (con excepciones) son menores a las pérdidas por fricción y por ese reciben el nombre de pérdidas menores. Cada accesorio que se encuentra en la trayectoria del flujo está caracterizado por un coeficiente de pérdida K_L que representa. Las pérdidas menores se calculan como:

Pérdidas Menores

$$h_L = K_L \frac{V^2}{2g} \qquad \textit{(Ec. 9)}$$

Dónde K_L es el coeficiente de pérdida, compuesto por la suma de las pérdidas individuales que se dan en uniones, válvulas, flexiones, codos, ramificaciones en forma de T, entradas, salidas, ensanchamientos y contracciones además de los tubo (-), V: velocidad del flujo (m/s), g: aceleración de gravedad (m/s^2) velocidad. Distintos valores de K_L para algunas singularidades se pueden encontrar en Anexo G.

4.2.7 *Standard Dimension Ratio* (SDR)

El SDR es una característica de las tuberías que define la relación entre el diámetro exterior de la tubería y el espesor de pared. Se define como

$$SDR = \frac{De}{s}$$

Donde De: diámetro exterior; s: espesor de pared. De esta relación se puede obtener el diámetro interior (útil para cálculos en mecánica de fluidos) como:

$$Di = De - 2 \cdot s$$

4.3 Bombas [5]

Bomba es un término general que designa a cualquier máquina hidráulica que añada energía a un fluido, sin embargo, aquellas máquinas hidráulicas que impulsan líquidos se denominan bombas, mientras que a aquellas que trabajan con gases pueden recibir variados nombres (Ej: ventilador, compresor). El incremento de la energía se experimenta como un aumento en la presión del fluido.

4.3.1 Tipos de Bombas

Existen tres tipos principales de bombas: de flujo radial, flujo axial y flujo mixto. En las bombas de flujo radial que también son llamadas bombas centrífugas el fluido entra de manera axial y se descarga de manera radial; las bombas de flujo axial, el fluido entra y sale axialmente; la bomba de flujo mixto es considerada intermedia entre centrífuga y axial, ya que el flujo entra de forma axial y descarga en un ángulo variable que se encuentra entre las direcciones radial y axial.

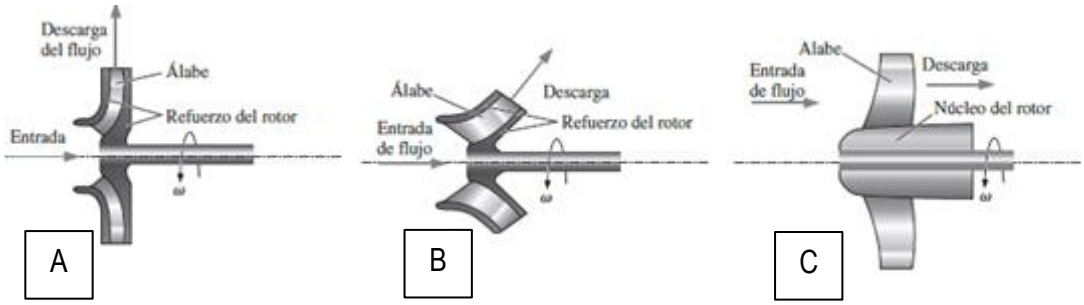


Figura 4.2. Bombas de tipo: a) flujo centrífugo b) flujo mixto c) flujo axial

4.3.2 Bombas centrífugas

Se identifican con facilidad por su carcasa de caracol llamada voluta. El ensamble que gira y que consiste en la flecha, los álabes del impulsor, el núcleo y el refuerzo del impulsor se denomina rodete o rotor. El fluido entra por la parte central de la bomba (ojo) y de ahí a los álabes rotatorios, donde adquiere velocidad tangencial y radial por la transferencia de cantidad de movimiento por parte de los álabes y velocidad radial por las fuerzas centrífugas.

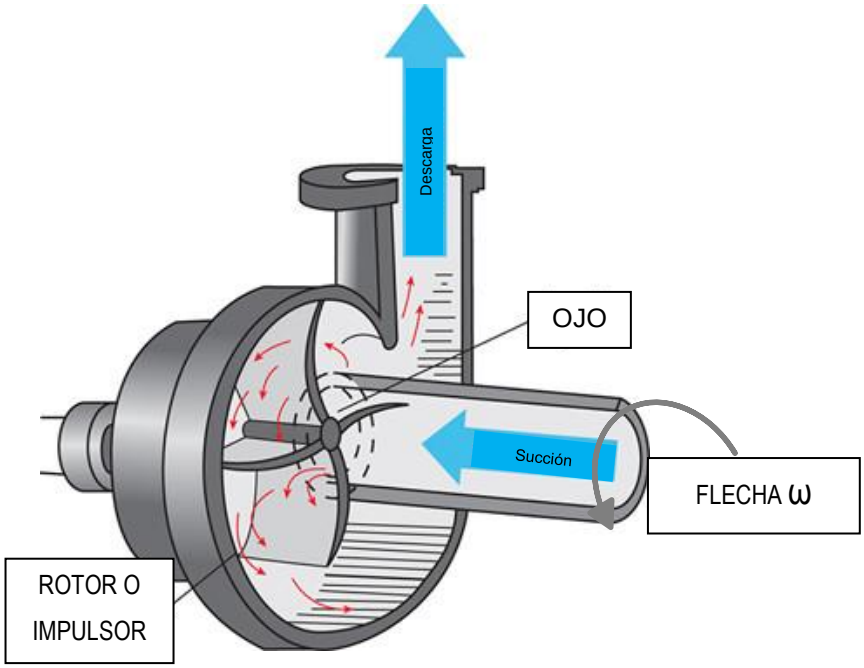


Figura 4.3. Vista en isométrica de una bomba centrífuga típica

4.3.3 Bombas axiales

En las bombas axiales los álabes del rotor se comportan como las alas los aeroplanos, ya que se genera una fuerza de sustentación por el cambio de velocidad en el fluido y la variación de presión que esto genera. Se utilizan generalmente para manejar grandes

caudales a cargas de bombeo relativamente pequeñas y en ellas no se puede hablar de una transmisión de energía a la corriente del fluido.

4.3.4 Parámetros fundamentales en bombas

Algunos parámetros fundamentales para analizar una bomba son:

4.3.4.1 Gasto volumétrico

La razón del flujo de masa por unidad de tiempo ṁ, es un parámetro obvio fundamental en el funcionamiento de las bombas. Para fluidos incompresibles es más común utilizar el gasto volumétrico que se define como:

Gasto Volumétrico

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho}(m^3/s) \qquad \textit{(Ec. 10)}$$

Donde $\dot{m}$: flujo másico (kg/s) y ρ: densidad del fluido (kg/m^3).

4.3.4.2 Carga hidrostática neta

Se define como el cambio en la carga hidrostática de Bernoulli entre la entrada y la descarga de la bomba (Ec. 11), su unidad de medida es de longitud y usualmente se menciona como altura de una columna de agua o algún fluido equivalente:

Carga hidrostática neta

$$H = \left(\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z\right)_{sal} - \left(\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z\right)_{ent} \qquad \textit{(Ec. 11)}$$

4.3.4.3 Potencia útil

Se define como el flujo másico ṁ a través de la bomba a una carga hidrostática H, por tanto:

Potencia útil $$\dot{W}_{potencia\ útil} = \dot{m} g\ H = \rho\ g\ \dot{V}\ H$$ *(Ec. 12)*

4.3.4.4 Potencia al freno

Es la energía que se suministra a la bomba, que debe ser mayor a la potencia útil, por las pérdidas por fricción, fugas internas, eficiencia del machón, etc. También se denomina potencia de accionamiento o potencia absorbida, abreviada como bhp (por sus siglas en inglés *brake horsepower*), por lo tanto:

Potencia al freno $$bhp = \dot{W}_{flecha} = \omega\ T_{flecha}$$ *(Ec. 13)*

Donde ω: velocidad rotacional de la flecha (rad/s) y T_{flecha}: momento o par de torsión.

4.3.4.5 Eficiencia de la bomba

Se define como la relación entre la potencia útil y la potencia suministrada:

Eficiencia de la bomba $$\eta_{bomba} = \frac{\dot{W}_{potencia\ útil}}{\dot{W}_{flecha}} = \frac{\dot{W}_{potencia\ útil}}{bhp} = \frac{\rho g \dot{V} H}{\omega T_{flecha}}$$ *(Ec. 14)*

4.3.4.6 Curvas de rendimiento

Las curvas de rendimiento de una bomba describen la relación entre la carga hidrostática y el gasto volumétrico, datos que permiten escoger la bomba más adecuada

para cada instalación. Además, entregan la eficiencia de la bomba y la potencia para un determinado caudal. Siguen la siguiente configuración que se muestra en Figura 4.4:

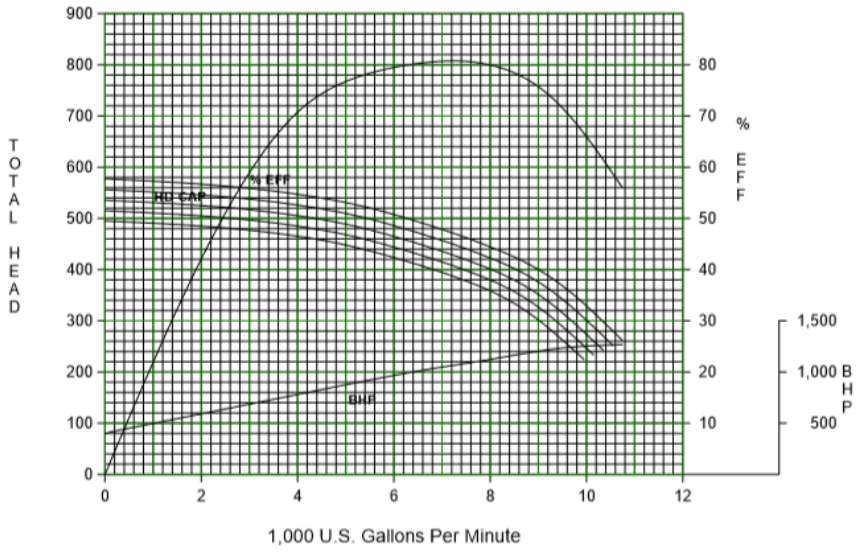


Figura 4.4. Curva de desempeño para familia de bombas Hazleton 14KL VNDM

4.3.4.7 Carga de aspiración neta positiva

Se define como la diferencia entre la carga de presión de estancamiento en la entrada de la bomba y la carga de la presión de vapor. Es necesario que tener la certeza que la presión local en cualquier punto de la bomba se mantiene por arriba de la presión de vapor.

Carga de aspiración neta positiva

$$NPSH = \left(\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g}\right)_{entrada\ de\ la\ bomba} - \frac{P_v}{\rho g} \qquad (Ec.\ 15)$$

4.3.4.8 Bombas en serie y en paralelo

Un conjunto de bombas puede ser configurado según sea la necesidad para trabajar en serie o en paralelo, como se muestra en Figura 4.5:

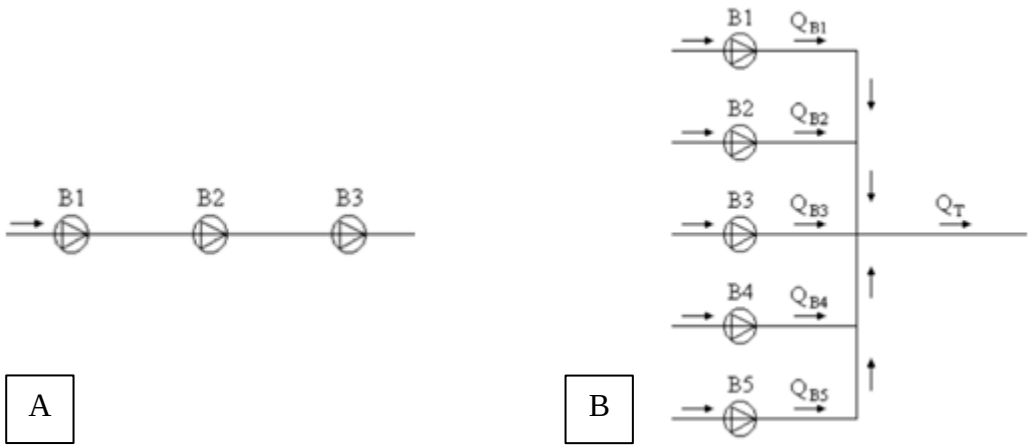


Figura 4.5. a) bombas en serie b) Bombas en paralelo

Bombas en serie: Cuando se conectan bombas en serie la carga hidrostática neta combinada es simplemente la suma de las cargas hidrostáticas netas de cada bomba, es decir:

Carga hidrostática neta combinada bombas en serie

$$H_{combinada} = \sum_{i=1}^{n} H_i \qquad \textit{(Ec. 16)}$$

Se debe tener especial cuidado de que ninguna de las bombas en serie opere más allá de su caudal de descarga libre, si esto sucede actúa como una pérdida de carga y se reduce en consecuencia, la cantidad total de volumen como se muestra en Figura 4.6:

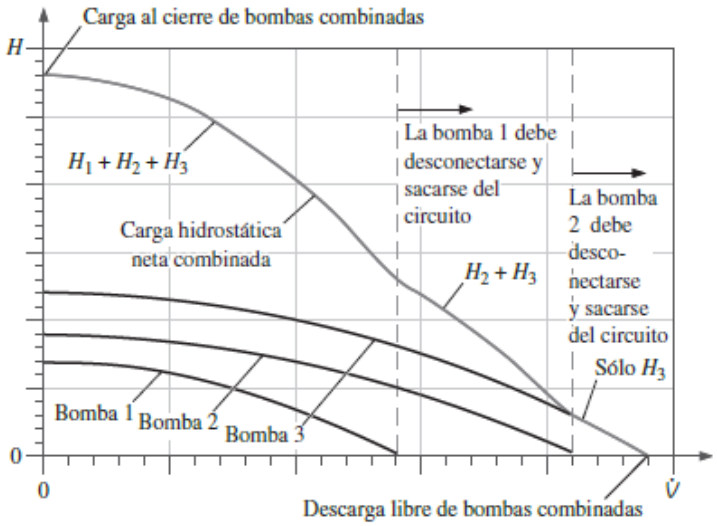


Figura 4.6. Curva de rendimiento de tres bombas en serie

Bombas en paralelo: Cuando dos o más bombas están conectadas en paralelo sus cantidades de volumen individuales se suma:

Capacidad combinada para n bombas en paralelo

$$\dot{V}_{combinada} = \sum_{i=1}^{n} \dot{V}_i \qquad \textit{(Ec. 17)}$$

Se debe tener especial cuidado porque la sobrepresión debe ser las mismas, pero el gasto volumétrico neto es la suma de la que pasa por cada rama, si las bombas no tienen las dimensiones adecuadas, la bomba más pequeña no sería capaz de manejar la carga por lo que el flujo podría regresarse, como se muestra en Figura 4.7:

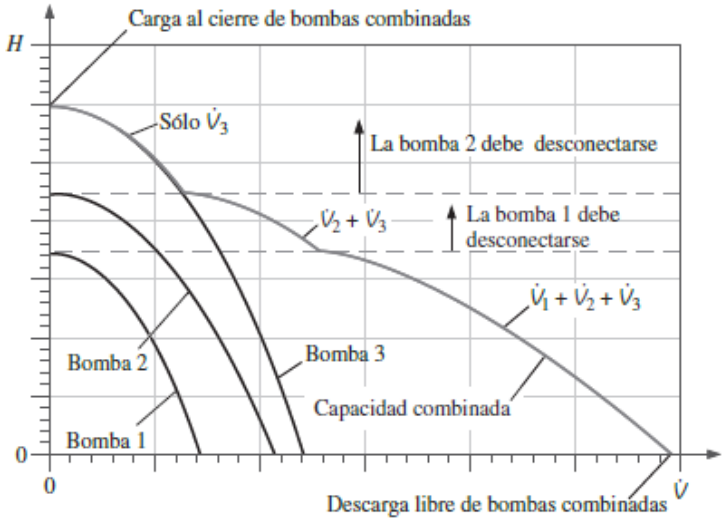


Figura 4.7. Curva de rendimiento para tres bombas en paralelo

4.3.4.9 Carga Hidrostática neta necesaria

Se define como la demanda de carga por parte del sistema, que considera la variación positiva de la presión estática del fluido, de la presión dinámica del fluido, de las diferencias de altura y de las pérdidas de carga mayores y menores de la red de tuberías; esta carga se incrementa con el aumento del gasto volumétrico. Entonces la carga hidrostática neta necesaria se define como:

Carga hidrostática neta necesaria

$$H_{necesaria} = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2 - \alpha_1 V_1^2}{2g} + (z_2 - z_1) + h_{L,total} \qquad \textit{(Ec. 18)}$$

Donde P: presión (Pa), V: velocidad del fluido (m/s), z: altura (m), $h_{L,}$total: pérdidas por fricción y menores, α_2: factor que depende del tipo de flujo, toma el valor de 1 para flujo turbulento y 2 para laminar, ρ: densidad (kg/m^3) y g: aceleración de gravedad (m/s^2).

4.4 Emisores

Los emisores son los elementos que van conectados a las líneas de irrigación y que entregan de forma controlada el fluido con el que son alimentados al terreno donde se encuentran instalados y según sea su configuración y tipo. Entre los emisores se encuentran de tipo gotero (caudales menores a 16 lph) y de tipo mini aspersor o difusor (caudales hasta los 200 lph) como se muestra en Figura 4.8:

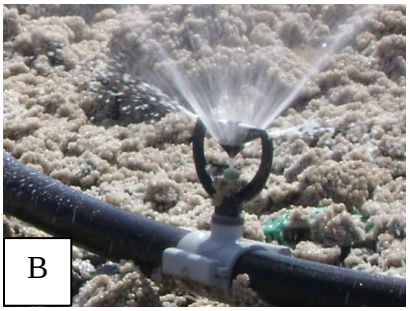


Figura 4.8. a) aspersor tipo gotero b) aspersor tipo aspersor

Del punto de vista hidráulico el caudal emitido se expresa como:

Descarga Emisor

$$q_e = \alpha H^y = \alpha \left(\frac{H_i + H_{i+1}}{2} \right)^y \qquad \textit{(Ec. 19)}$$

Donde: α: constante del emisor; y: exponente del emisor y H: presión en el emisor. Esta relación puede ser entregada por el fabricante o ser obtenida a través del gráfico caudal v/s presión entregada por el fabricante.

4.5 Diseño de sistema de riego basado en el método del volumen de control [10]

4.5.1 Desarrollo del modelo

El modelo matemático está basado en dos ecuaciones diferenciales de primer orden, dónde los variables desconocidas son la presión y velocidad. Este modelo describe el flujo a lo largo de un lateral dispuesto de goteros de micro-irrigación. Los principios de conservación de masa y energía se aplican para un volumen de control elemental de largo dx como se muestra en Figura 4.9, se cumple entonces la ecuación (Ec. 20) y (Ec. 21):

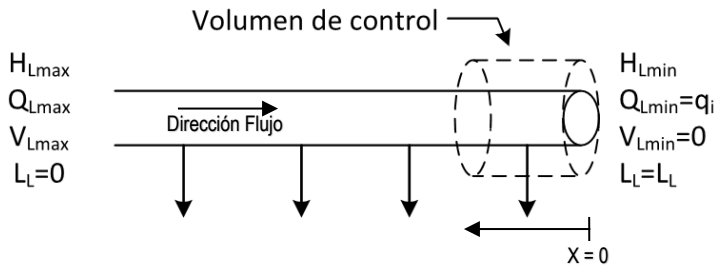


Figura 4.9. Volumen de control elemental

$$A\,V_x = A\,V_{x+dx} + q_e \qquad \textit{(Ec. 20)}$$

$$H_x + \frac{1}{2g}{V_x}^2 = H_{x+dx} + \frac{1}{2g}\,{V_{x+dx}}^2 + h_f \qquad \textit{(Ec. 21)}$$

Con el fin de simplificar se considera $(z_{x+dx}-z_x)=0$

Donde A: área de sección transversal de la tubería; V: velocidad del flujo en el volumen de control entre x y x+dx y q_e: descarga del emisor que se asume uniformemente

distribuido a través del largo dx; h_f: es la pérdida de presión por fricción entre x y x+dx cuyo valor está dado por:

$$h_f = aV^m dx \qquad \textit{(Ec. 22)}$$

Donde m: constante que toma el valor de 1,852 cuando se trabaja en S.I. El valor del parámetro a está dado por las ecuaciones de Hazen-William para flujo turbulento y laminar como:

Flujo turbulento → $a = \frac{K}{C^m {A_L}^{0,5835}}$

Flujo laminar → $a = \frac{32\upsilon}{g{D_L}^2}$

Donde C: coeficiente de Hazen-William dado por el material de la tubería, K: coeficiente proporcional que toma un valor de 5,88 (-) cuando el área se expresa en m^2, velocidad en m/s y h_f en metros, el exponente m para flujo laminar es de 1 (-) y de 1,852 (-) para flujo turbulento, A_L: es el área de sección transversal de la tubería (m^2), D_L: diámetro interior (m), υ: viscosidad cinemática (m^2/s), g: es la aceleración de gravedad 9,81 (m/s^2).

Luego de expandir los términos H_{x+dx} y V_{x+dx} la ecuación (Ec. 20) y (Ec. 21) se escriben como:

$$A\,\frac{\partial V}{\partial x}dx + q_e = 0 \qquad \textit{(Ec. 23)}$$

$$H_x + \frac{1}{2g}{V_x}^2 = H_{x+dx} + \frac{\partial H_x}{\partial x}dx + \frac{1}{2g}\left({V_x}^2 + 2V_x\frac{\partial V_x}{\partial x}dx + \left(\frac{\partial V_x}{\partial x}dx\right)^2\right) + h_f \qquad \textit{(Ec. 24)}$$

Si se considera el factor $\left(\frac{\partial V_x}{\partial x}dx\right)^2$ despreciable, la ecuación (Ec. 24) se puede escribir como:

$$\frac{\partial H}{\partial x}dx + \frac{V}{g}\frac{\partial V}{\partial x}dx + h_f = 0 \qquad \textit{(Ec. 25)}$$

Finalmente, combinando las ecuaciones (Ec. 19), (Ec. 22), (Ec. 25) y definiendo un nuevo espacio variable X definido como X=L-x, el sistema de ecuaciones se expresa como:

$$\frac{\partial V}{\partial X} = \frac{\alpha}{A\Delta x}H^y \qquad \textit{(Ec. 26)}$$

$$\frac{\partial H}{\partial X} = aV^m - \frac{\alpha}{Ag\Delta x}VH^y \qquad \textit{(Ec. 27)}$$

Para determinar la solución a este sistema de ecuaciones diferenciales parciales (EDO) se utiliza algún método de aproximación de soluciones de sistema de ecuaciones diferenciales parciales que en este estudio corresponde al método de aproximación de Euler (ver capítulo 0, página 39) con las siguientes condiciones iniciales: $V_{(X=0)}=0$ y $H_{(X=0)}=H_{min}$, a través de un proceso iterativo programado en *Excel*. Para integrar simultáneamente las ecuaciones solo debemos estimar dos presiones al inicio del lateral (X=0) obteniendo dos soluciones iniciales al sistema que denominaremos H^o_{max} y H^1_{max}. Es posible realizar un nuevo valor para H_{min} haciendo uso del polinomio de interpolación de Lagrange de grado uno con el fin de obtener una nueva solución H^2_{max}. Esta nueva estimación se escribe como (Mathews, 1998):

$$H_{min} = \frac{H_{max} - H^1_{max}}{H^0_{max} - H^1_{max}}H^0_{min} + \frac{H_{max} - H^0_{max}}{H^1_{max} - H^0_{min}}H^1_{min} \qquad \textit{(Ec. 28)}$$

Este proceso se realiza n veces hasta que el error sea menor al error $\varepsilon = \varepsilon_1$ que se calcula como:

Error $$\varepsilon = \frac{H_{min}^{n} - H_{min}^{n-1}}{H_{min}^{n}}$$ *(Ec. 29)*

4.5.2 Cálculo de uniformidad

Para expresar la variación y uniformidad de una serie de laterales o ramificaciones dentro del sistema en estudio o en diseño es posible obtener coeficientes de variación o uniformidad según sea el caso:

Coeficiente de variación de Caudal $$C_{vq} = \frac{\sigma_q}{q_{prom}}$$ *(Ec. 30)*

Coeficiente de variación de Presión $$C_{vH} = \frac{\sigma_H}{H_{prom}}$$ *(Ec. 31)*

Donde σ es la desviación estándar ($\sqrt{\sum|x - \bar{x}|/n}$), q_{prom} y H_{prom}: valores promedios de caudal de descarga y presión.

El coeficiente de descarga uniforme (C_{uq}) y presión uniforme (C_{uH}) se calculan por la siguiente relación:

Coeficiente de descarga uniforme $$C_{uq} = 100\left(1 - C_{vq}\right)$$ *(Ec. 32)*

Coeficiente de uniformidad de Presión	$C_{uH} = 100(1 - C_{vH})$	*(Ec. 33)*

4.6 Aproximación solución sistema ecuaciones diferenciales ordinarias [12]

Existen variados métodos para la aproximación de soluciones de sistema de ecuaciones diferenciales parciales, entre ellos el método de Euler, de Cauchy, Euler – Cauchy, Runge Kutta, etc. En este informe se utilizará el método de Euler para sistema de dos ecuaciones, que sigue la siguiente estructura:

Dada dos ecuaciones que pertenecen a un sistema, las dos condiciones iniciales y el paso *"h"* que lo definen:

$$\frac{dx}{dt} = f_1(x, y) = f_1(x_1, x_2)x(t_0) = x_0$$

$$\frac{dy}{dt} = f_2(x, y) = f_2(x_1, x_2)y(t_0) = y_0$$

$$\mathrm{h} = \mathrm{h}_0$$

La ecuación vectorial que representa al sistema se compone de:

Variable vectorial: $X_0 = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} \epsilon\ \mathbb{R}^2$

Incógnita vectorial: $\mathrm{F}(t, x) = \begin{bmatrix} f_1(x_1, x_2) \\ f_2(x_1, x_2) \end{bmatrix} \epsilon \mathbb{R}^2$

Luego se define t_1 y X_1 como:

$$\mathrm{t}_1 = t_0 + h$$

$$X_1 = X_0 + hF(t_0, x_0) = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix}$$

Así consecutivamente para t_n y X_n para n=0,1,…,n-1,n. Genéricamente se expresa como:

$$t_{n+1} = t_n + h$$

$$X_{n+1} = X_n + hF(t_n, x_n) = \begin{bmatrix} x_{n+1} \\ y_{n+1} \end{bmatrix}$$

4.6.1 Programación de proceso iterativo y validación

Con el objetivo de poder determinar las soluciones del sistema de ecuaciones presentado en capítulo 4.5 para los laterales de la red se programa una macro en *Excel* que utilice el método de Euler para encontrar las presiones a lo largo del número de laterales que se deseen, el código de elaboración propia en Visual Basic se muestra en **Anexo H**.

El desarrollo del programa para cada lateral entrega un formato como se muestra en Figura 4.10:

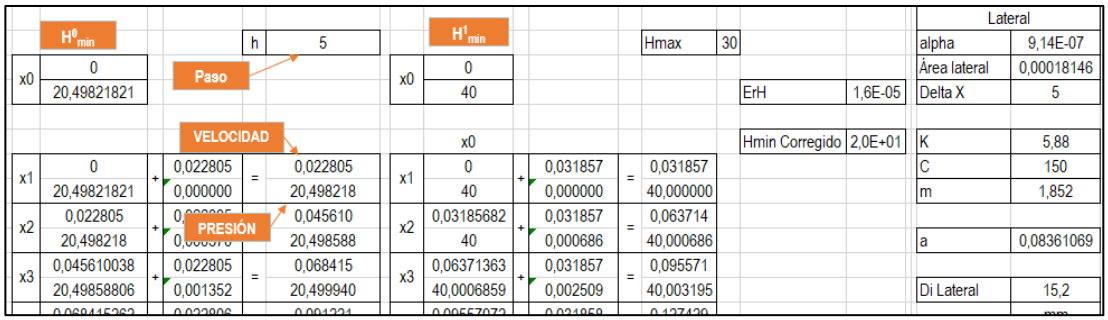


Figura 4.10. Formato Excel para resolución de sistema de ecuaciones

4.6.2 Validación

Para validar el programa se consideran los resultados obtenidos por el método de elementos finitos por *Bralts et al.* (1993), método CVM y Runge Kutta por *Zella et al.* (2002) para el siguiente ejemplo:

Un lateral con inclinación cero de polietileno negro de largo total 250 metros y un diámetro interno de 15,2 [mm]. A lo largo de este lateral se encuentran 50 emisores a intervalos iguales. Las características del emisor son: $\alpha = 9{,}14E - 7$, exponente y=0,5, C=150, m=1,852, K=5,88 y g=9,81 m/s^2. La viscosidad cinemática del agua es $\mu = 10^{-6}$ m^2/s. La presión máxima de lateral es establece como 30 [m]. Los resultados obtenidos son:

Parámetro	Euler	Zella (CVM)	RK4 (Zella)	Bralts (FEM)
Vmax(m/s)	1,200612	1,199	1,200	-
Hmax (m)	30	30	30	30
Hmin (m)	20,4982	20,302	20,435	20,3

Se determina que con una diferencia de 0,3% con respecto a Runge Kutta 4 y 0,9% con método de CVM, el método es válido.

4.6.3 Programa para determinación parámetros peines

Luego de determinar las presiones en cada lateral, es necesario determinar los parámetros para cada uno de los 8 peines de los que se compone un paño (que se compone de 40 laterales); esto significa encontrar la presión y el caudal a la entrada de cada peine. Posterior a eso es necesario calcular las pérdidas de presión, las presiones

y los caudales a lo largo de la línea principal. Para esto se programa una macro en Excel que sigue la estructura que se muestra en **Anexo I**.

4.7 Metalurgia

Un aspecto importante de la ciencia metalúrgica que afecta y va de la mano con el área mecánica de estudio es la curva cinética de un paño. Esta curva relaciona el porcentaje de recuperación metalúrgica de cobre del material apilado con la razón de lixiviación.

La recuperación metalúrgica es la razón porcentual entre la masa de material útil obtenido en el concentrado y la masa de material útil de alimentación o apilado [16]. La razón de lixiviación se define como el volumen de solución irrigados a cierto volumen másico de material apilado.

Para poder obtener la curva cinética de un mineral en particular se realiza, a través de softwares especializados de simulación metalúrgica a través del uso de las tres ecuaciones de balance de materiales [18], estas son:

a) Balance de Masa:

Para un elemento de volumen $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$ como se muestra en Figura 4.11:

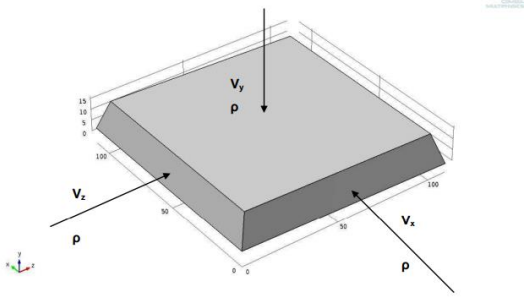


Figura 4.11, Elemento de volumen diferencial

Se puede escribir el balance de masa como:

$$MasaEntrante\ -\ Masa\ que\ Sale = Masa\ acumulada \pm Masa\ que\ reacciona$$

Considerando las velocidades de la solución lixiviante, densidad, velocidad de reacción, etc. la ecuación de balance de masa se expresa como:

Balance de Masa

$$D \cdot \left(\frac{\partial^2 \rho_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \rho_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \rho_z}{\partial z^2}\right) + \frac{\partial(\rho_y \cdot \upsilon_y)}{\partial y} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + r_i \qquad \textit{(Ec. 34)}$$

Donde D: coeficiente de difusión (-), ρ: densidad (kg/m^3), υ: velocidad (m/s), r_i: velocidad de reacción (moles/s).

b) Balance de Momento

Desde la ecuación de continuidad, se puede hacer un balance de momento para el mismo volumen diferencial, considerando que:

$$\begin{bmatrix} Velocidad\ de \\ acumulación\ de \\ momento \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Velocidad\ del \\ momento\ de \\ entrada \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Velocidad\ del \\ momento\ de \\ salida \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Fuerzas\ generadas \\ que\ actuan\ en\ el \\ sistema \end{bmatrix}$$

Quedando la ecuación general como:

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho\upsilon = -[\nabla\rho\upsilon\upsilon] - \nabla P - [\nabla \cdot \tau] + \rho g$$

Luego de considerar presión P, gravedad g y densidad constante, desarrollando el gradiente y considerando solo movimiento en el eje y la ecuación de balance de momento se expresa como:

Balance de Momento

$$v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} \qquad \textit{(Ec. 35)}$$

Donde v_y: velocidad de la solución lixiviante (m/s), μ: viscosidad dinámica (Pa · s), ρ: densidad del material (kg/m^3).

c) Balance de energía

Se considera que durante el paso de la solución lixiviante a través de la pila se genera calor ($\Delta H_i \cdot r_i$) y que existe transferencia de calor por convección y conducción la ecuación de balance de energía se expresa como:

Balance de Momento

$$C_p \left(\frac{\rho \cdot \partial T}{\partial t} + \frac{T \cdot \partial \rho}{\partial t} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \Delta H_r \cdot r_i \qquad \textit{(Ec. 36)}$$

Donde C_p: calor específico (J/(kg·K)), ρ: densidad (kg/m^3), T: temperatura (K), k: conductividad térmica (J/(m·s·K)), ΔH_r: entalpía de reacción (J) y r_i: velocidad de reacción (moles/s).

Después de definir las variables que definen a las ecuaciones (Ec. 34),(Ec. 35) y (Ec. 36) la geometría que define a la pila y las características del fluido lixiviante a través del uso de algún software de simulación como "*Comsol Multiphysics"* se obtiene una curva cinética característica para cada tipo de mineral.

Una curva típica se puede ver en Gráfico 4.1.

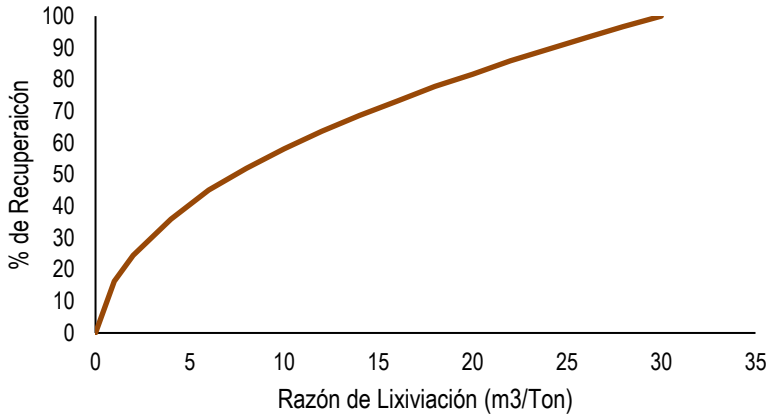


Gráfico 4.1. Cinética del mineral

A través de esta curva se puede obtener el porcentaje de recuperación de cobre según la razón de lixiviación añadida al mineral para un paño en particular.

4.8 Mantenimiento [15] [17]

4.8.1 Conceptos Básicos

4.8.1.1 *Mean Time to Repair* (MTTR)

Es el tiempo promedio para reparar un activo por sus siglas en inglés. Este concepto mide los tiempos de reparación y tiempos de retraso que se encuentren dentro del control de la organización. Se expresa como:

Mean Time To Repair

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} TTR_i}{n} \qquad \textit{(Ec. 37)}$$

Donde TTR: tiempo para reparar una falla y n: número de fallas

4.8.2 Mantenibilidad

La Mantenibilidad de un activo se define como la facilidad que tiene un ítem de ser mantenido bajo condiciones o estándares establecidos. También como la probabilidad de que un equipo o sistema pueda ser reparado satisfactoriamente en un tiempo determinado. Dicho tiempo deénde de la dificultad técnica que tiene el proceso de mantenimiento en diagnosticar la falla funcional y repararla. Aquí tenemos en cuenta el MTTR del equipo. Así, durante un periodo determinado t, se tiene:

Mantenibilidad

$$M_{(t)} = 1 - e^{-\frac{t}{MTTR}} \qquad \textit{(Ec. 38)}$$

4.8.2.1 Mejorando la Mantenibilidad

La mantenibilidad no es una propiedad o característica que debamos tener en cuenta sólo para la ejecución de fallas imprevistas, sino también para programar rutinas definidas en los planes de mantenimiento preventivo. Para mejorar la mantenibilidad de un activo pueden observarse factores internos y externos que influyen como se muestra en Figura 4.12:

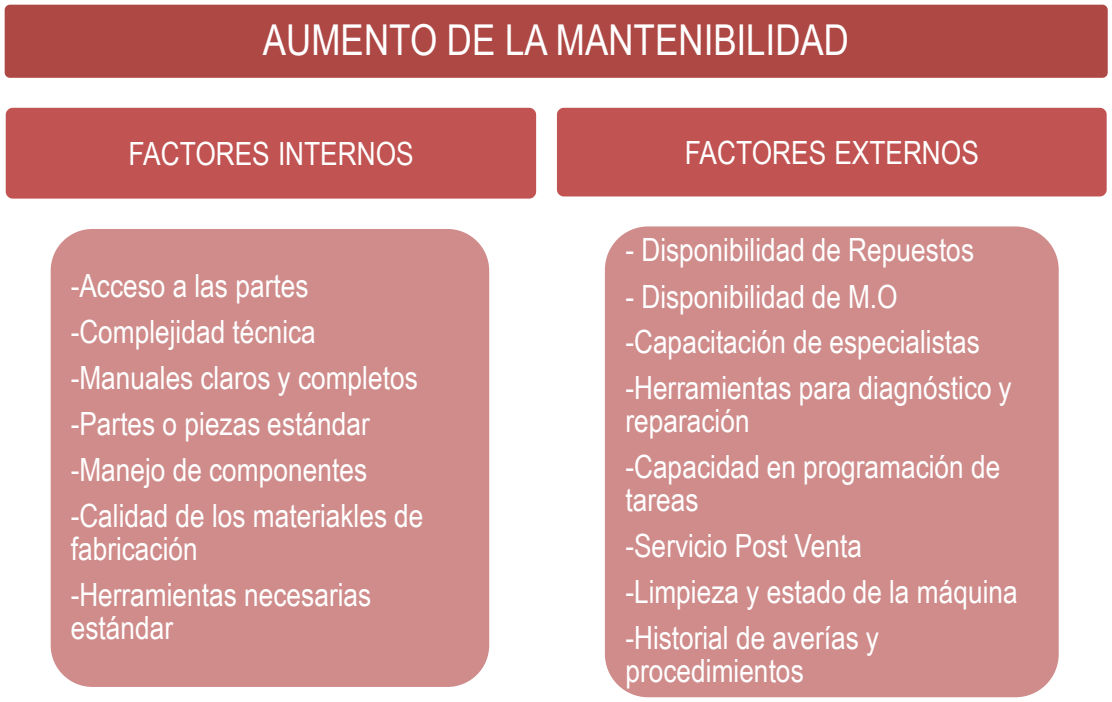


Figura 4.12. Factores que afectan la mantenibilidad

4.8.3 Análisis de Criticidad

Se ocupa para jerarquizar los activos de una compañía con la finalidad de que los planes de corto y largo plazo se alineen con los objetivos del negocio. Establecer esta jerarquía es entender que tan valioso es el activo en particular para el proceso que generalmente se establece según el impacto que tenga la falla de este. Para realizar el análisis de

criticidad se ocupan ciertas técnicas cualitativas o cuantitativas que se presentan a continuación

4.8.3.1 Método Cualitativo

Se basa fuertemente en la opinión de las personas, la experiencia y la intuición ocupando encuestas, entrevistas y cuestionarios para establecer una jerarquía según la criticidad percibida. Este método se ahorra la necesidad de data como frecuencia de incidentes o severidad de estos entregando un método bastante bueno que si se aplica de forma adecuada entrega resultados satisfactorios, sin embargo, una de las falencias más grandes es la incapacidad de encontrar un grado de consistencia y uniformidad debido al carácter de apreciativo que tienen las características de riesgo y consecuencias. Un ejemplo de este método es el que se presenta en Figura 4.13 en donde se establece una categoría A, B o C para cada aspecto (Medio ambiente, Seguridad, etc) para llegar finalmente siguiente las líneas a una categoría A, B o C del activo en su conjunto.

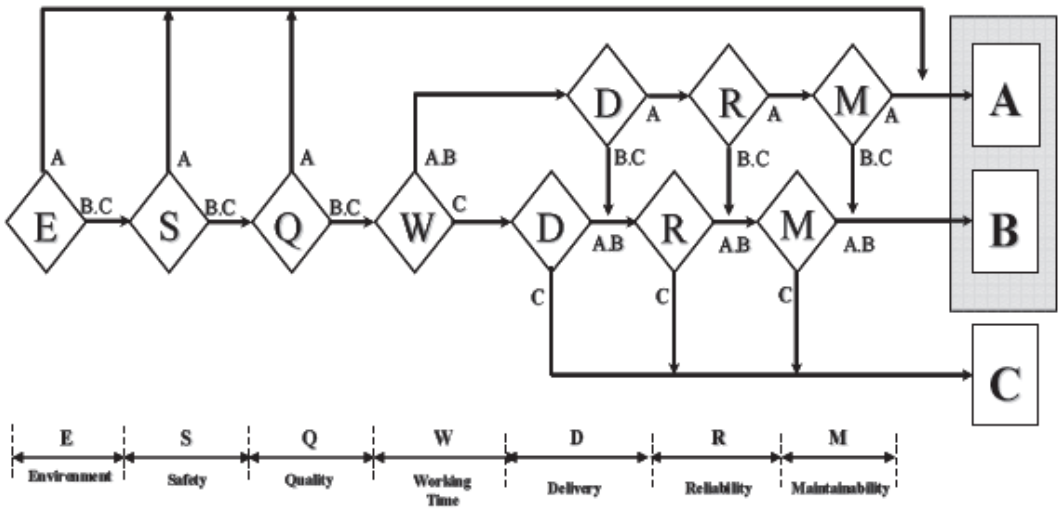


Figura 4.13. Diagrama de flujo de criticidad

4.8.3.2 Método Cuantitativo

Tiene que ver con el uso de métodos de valoración del riesgo que se define como el impacto potencial a un activo que puede surgir desde el proceso actual o de algún evento en el futuro. En un análisis de evaluación numérica, ponderación del riesgo, ester involucra la probabilidad de la ocurrencia del evento y el impacto que este podría causar; se define entonces como:

Riesgo $$R = P \cdot C$$ *(Ec. 39)*

Donde P: probabilidad de ocurrencia y C: Consecuencia. Los factores que impactan en la consecuencia es de libre elección de la organización y así misma su ponderación, considerando elementos como Impacto Operacional, Impacto al Medio Ambiente, Impacto en la seguridad, Impacto en los costos de mantenimiento, etc. generando una ecuación que sigue la siguiente estructura:

Consecuencia $$C = (IO * FO) + CM + ISMA$$ *(Ec. 40)*

Donde IO: Factor de Impacto Operacional, FO: Factor de Flexibilidad Operacional, CM: Factor de Costo de Mantenimiento, ISMA: Factor de impacto en Seguridad y Medio Ambiente.

Establecidos estos parámetros se le otorga un valor numérico a los factores ya descritos y con ello una tabla de equivalencias que jerarquice los activos según lo defina la compañía, por ejemplo la evaluación para la frecuencia se presenta en Tabla 1 y para un factor de impacto de la consecuencia en

Tabla 2:

Tabla 1. Clasificación y evaluación numérica de frecuencia de falla

Frecuencia de Falla	Fallas por año	Valor
Pobre	>4	4
Medio	2-4	3
Bueno	1-2	2
Excelente	<1	1

Tabla 2. Clasificación y evaluación numérica de Costos de Mantenimiento

Costo de Mantenimiento	Consecuencia	Valor
Alto	≥ 20.000 USD	4
Bajo	< 20.000 USD	1

Finalmente, obtenido los valores de frecuencia y consecuencia se ingresa a una tabla definida por la organización para establecer la criticidad del activo que sigue el siguiente formato que se presenta en Figura 4.14.

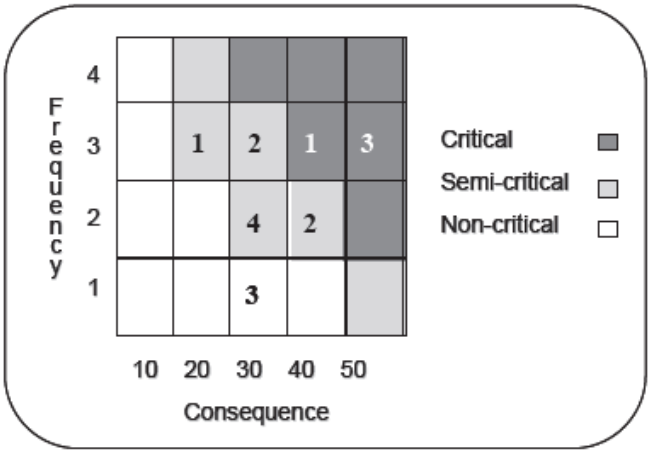


Figura 4.14. Matriz de Criticidad de activos

5 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE LIXIVIACIÒN Y DISPOSICIÓN DE EQUIPOS

Un diagrama general del proceso de lixiviación se muestra en Figura 5.1. Los procesos se definen desde 5.1 a 5.7.

5.1 General

Para realizar el proceso de lixiviación es necesario contar con una pila de material que se prepara formando montones de forma trapezoidal y altura determinadas a la que se le realiza un proceso de riego con una solución preparada. Esta solución decanta hasta la base de la pila enriqueciéndose en su concentración de cobre al interactuar con el mineral apilado, este proceso es llamado percolación. La solución enriquecida se lleva a la planta de extracción por solvente y posteriormente a la de electro-obtención, dónde termina el proceso de obtención de cátodos de cobre.

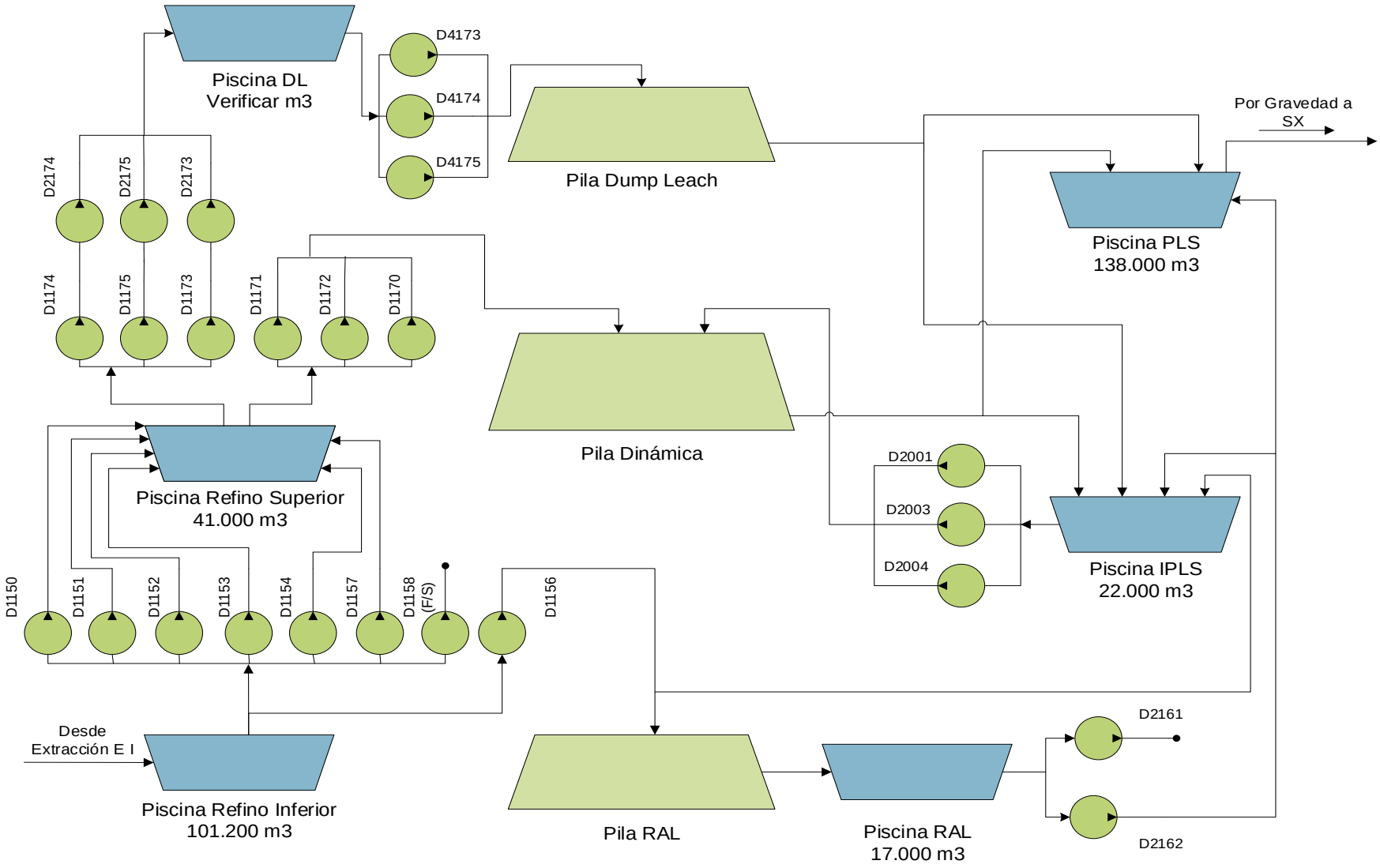


Figura 5.1. Diagrama de Flujo proceso de Lixiviación

5.2 Construcción de las pilas y apilamiento

El actor principal del proceso de lixiviación es la pila dinámica o pila HL, compuesta por mineral proveniente del proceso de chancado que posee una granulometría de 12 milímetros aproximadamente y que ha sido apilado sobre una carpeta impermeable de plástico HDPE de 2 mm en una extensión de 2 kilómetros de largo por 650 metros de ancho (130 hectáreas). Para mayor detalle ver capítulo 5.10.

Figura 5.2. Pila Dinámica

Este mineral ha sido sometido previamente a un proceso de curado a través de la adición de ácido sulfúrico en el traspaso entre la correa CT-32 y correa CT-34 (ver Figura 5.3) y desde el año 2017 a la adición de sal en la misma correa CT-32.

Figura 5.3. Proceso de curado traspaso CT-32 - CT-34

Generalmente este proceso de curado involucra la adición de agua y ácido, pero dadas las características del chancado terciario, que utiliza chancadores tipo *water flush*, el material chancado que va camino a ser apilado ya contiene la proporción de agua necesaria para el proceso de lixiviación y para someterse a los procesos que le siguen. El apilamiento se realiza mediante un sistema de correas y apilador móvil o *Tripper 201* (Ver Figura 5.4).

Figura 5.4. Apilamiento en pila dinámica Tripper 201

También contribuyen a la obtención de solución PLS e IPLS y se someten a proceso de lixiviación la pila *dump Leach (DL)* cuyo material proviene directamente de la mina, es decir, que no ha sido sometido a proceso de chancado dada su menor ley y es apilado y lixiviado; y la pila RAL que está compuesta de mineral que ha sido removido de la pila dinámica pero que aún contiene cobre que es aprovechado a través de la

lixiviación. Ambas pilas (DL & RAL) son regadas con solución de refino. La ubicación de cada una de estas pilas se muestra en Figura 5.5.

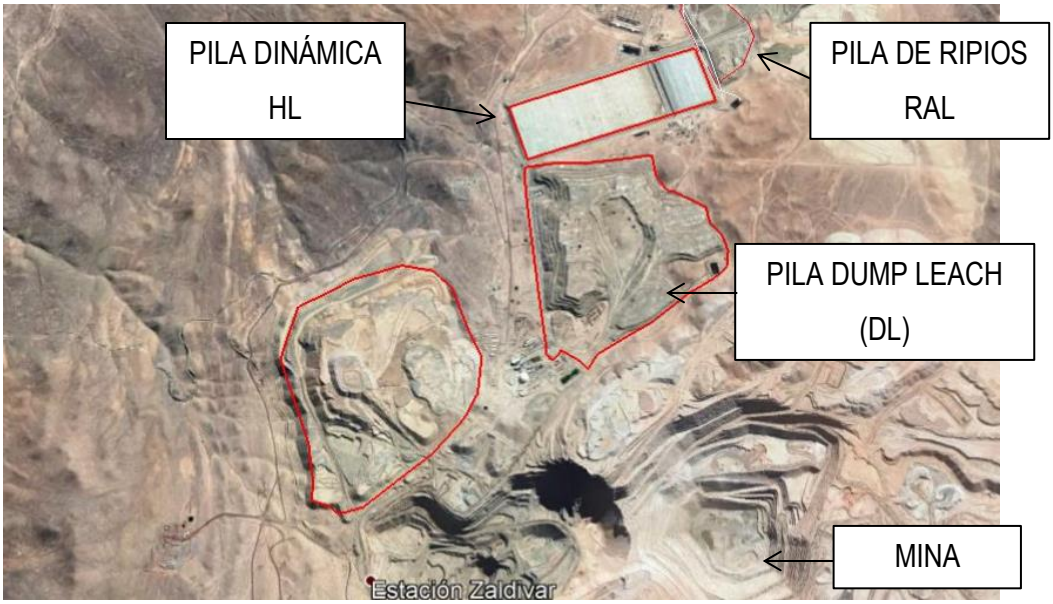


Figura 5.5. Pila Dinámica, RAL y DL.

5.3 Riego Pila Dinámica

El riego de la pila se realiza a través de paños telescópicos de HDPE en dos etapas, riego con solución IPLS y con solución de refino desde las piscinas de IPLS y refino superior. Un diagrama general del riego de la pila dinámica se muestra en Figura 5.6.

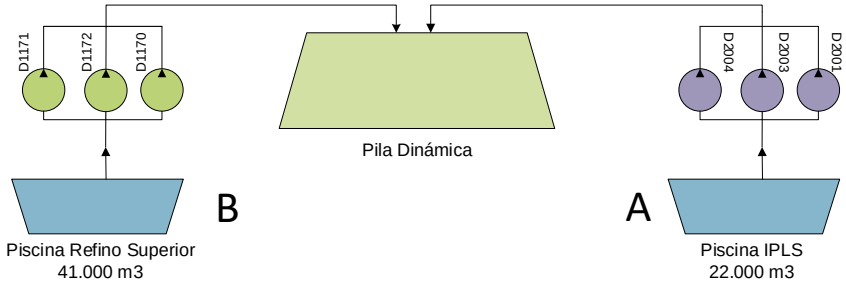


Figura 5.6. Sistema de bombeo IPLS y Refino a Pila Dinámica

Para ambas piscinas, las bombas se encuentran instaladas sobre balsas que se encuentran dentro de las piscinas, como se muestra en Figura 5.7.

Figura 5.7. Bombas Hazleton en piscina de refino superior

5.3.1 Primera etapa, IPLS:

En primera instancia la pila se riega con solución de IPLS (*Intermediate Pregnant leaching solution*), solución que ha sido almacenada en la piscina de IPLS (datos en Tabla 3) proveniente del proceso de percolación de la pila dinámica, pila *dump leach* o pila de ripios RAL y cuya concentración de cobre es de aproximadamente 0,45 gpl.

Este primer riego se realiza sobre el material recién apilado durante aproximadamente 160 días. El paño inicial recibe el nombre de paño de cabeza.

Tabla 3. Características Piscina IPLS

Parámetro	Valor	Unidad
Capacidad	25.000	[m^3]
Superficie	7000	[m^2]
Altura geográfica	3080	[m]

El riego con solución IPLS de la pila HL se realiza a través de 3 bombas verticales modelo Hazleton 14 KL (Bombas 2001, 2002 y 2004) (datos técnicos en 5.8.2.1 - página 76); existe una cuarta bomba y línea que se encuentra fuera de servicio (bomba 2003) como se muestra en Figura 5.8.

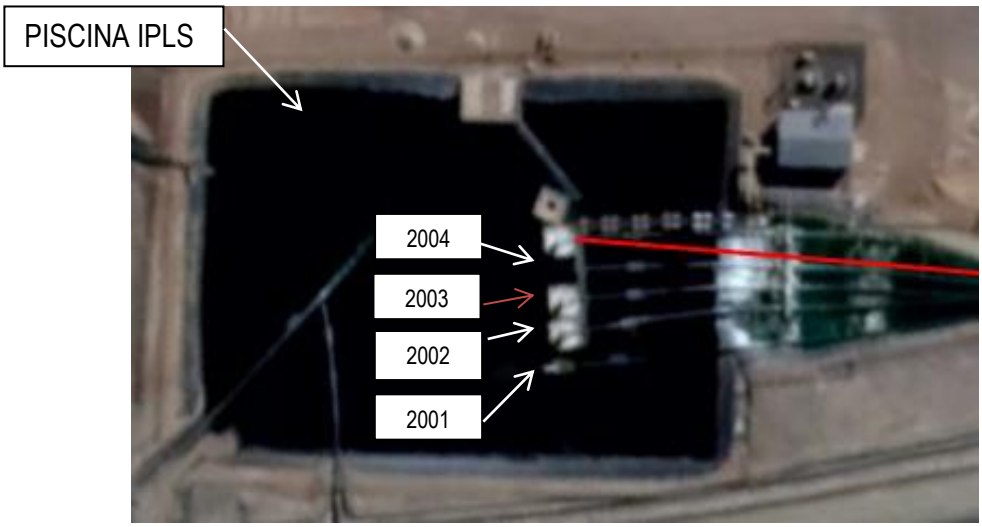


Figura 5.8. Bombas piscina IPLS

Las bombas instaladas tienen las siguientes características que se muestran en Tabla 4:

Tabla 4. Características Bombas Piscina IPLS

Bomba	Modelo	Impulsor (pulgadas)
2001	14 KL	25
2002	14 KL	25
2004	14 KL	24,125

Las líneas provenientes desde las bombas 2001 y 2002 se unen en un cuadro de válvulas o manifold en el sector sureste de la pila como se muestra en Figura 5.9, mientras que la línea de la bomba 2004 sigue de forma independiente por el costado de la pila.

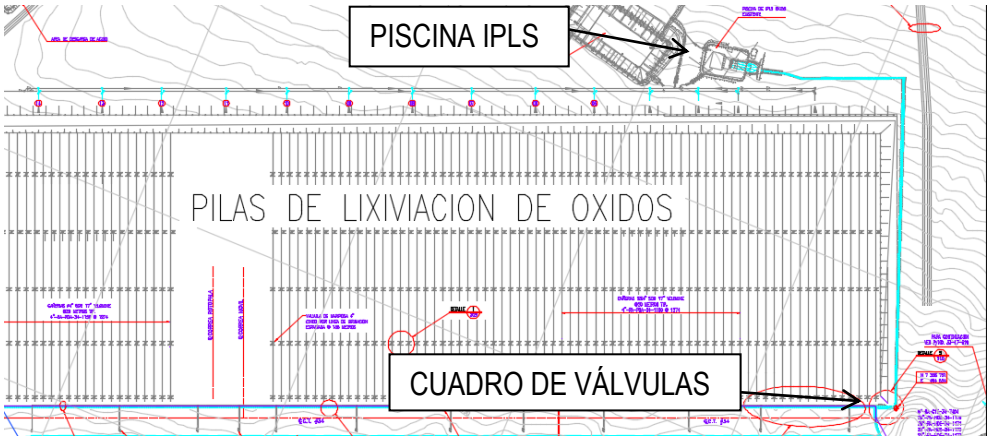


Figura 5.9. Cañerías de irrigación IPLS a pila HL

El cuadro de válvulas al que llegan las líneas de la bomba 2001 y 2002 no sigue la configuración original que se muestra en Figura 5.10 ya que se compone actualmente de solo dos entradas y una salida. La línea de la bomba 2004 no ingresa a este manifold.

La salida del manifold mencionado es una línea HDPE de 26” SDR11 que se extiende hasta el final de la pila.

La longitud de las cañerías desde las bombas instaladas en la piscina IPLS al cuadro de válvulas (detalle en Figura 5.10) es de aproximadamente 1.225 metros.

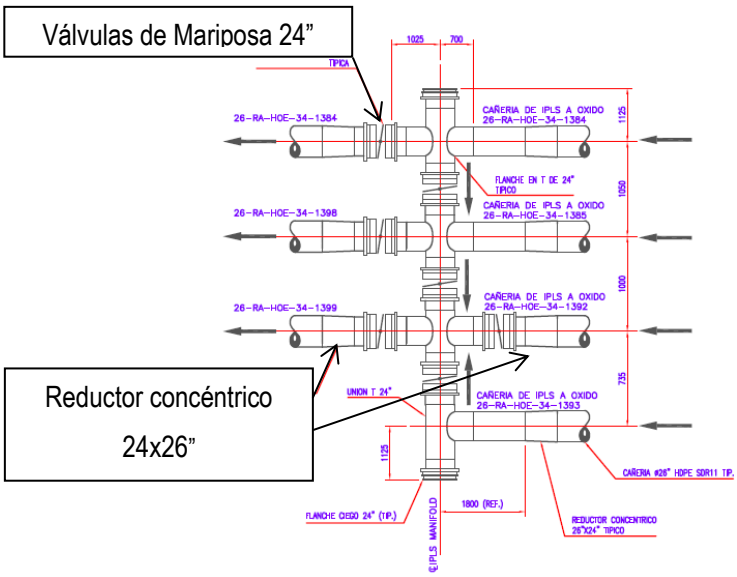


Figura 5.10. Cuadro de válvulas solución IPLS

La línea de salida del manifold (1) posee una válvula de mariposa de 24” que se une a la cañería de salida (que al igual que entrada es de HDPE de 26 pulgadas) a través de un reductor concéntrico 26”x24”.

La longitud desde el manifold hasta la cañería de irrigación dependerá del paño que se esté irrigando con IPLS según la operación y sigue la configuración que se muestra en Figura 5.13; cada ramificación se utiliza para el riego de 2 paños contiguos con la configuración que se muestra en capítulo 5.3.3.

El flujo solicitado para las bombas de IPLS es de 4100 m3/hr en conjunto.

5.3.2 Segunda etapa, Refino:

Se realiza con solución de refino (PLS descargado desde el proceso de extracción por solvente SX), almacenada en la piscina de refino superior (datos en Tabla 5) cuya solución es más pobre en contenido de cobre que la solución IPLS; esta concentración ronda los 0,1 a 0,2 gpl.

Tabla 5. Características Piscina Refino Superior

Parámetro	Valor	Unidad
Capacidad	25.000	[m^3]
Superficie	8000	[m^2]
Altura geográfica	3080	[m]

El riego con refino se realiza a través 2 bombas verticales Hazleton modelo 14KL (bombas 1170 y 1171) y 1 bomba vertical Hazleton modelo 14 G (bomba 1172) (datos técnicos en 5.8.2.2 - página 77). Las bombas instaladas tienen las siguientes características que se muestran en Tabla 4:

Tabla 6. Características Bombas Piscina Refino Superior

Bomba	Modelo	Impulsor (pulgadas)
1170	14 G	22,5
1171	14 KL	22,5
1172	14 KL	22,5

Las bombas 1170 y 1171 se unen a la salida en un manifold con una salida como se muestra en Figura 5.11. En resumen, desde la piscina de refino superior salen dos líneas independientes de HDPE de 26” que se unen al grupo de cañerías que se muestra en Figura 5.9 al costado de la pila HL de la siguiente forma:

Figura 5.11. Líneas desde piscina de Refino Superior

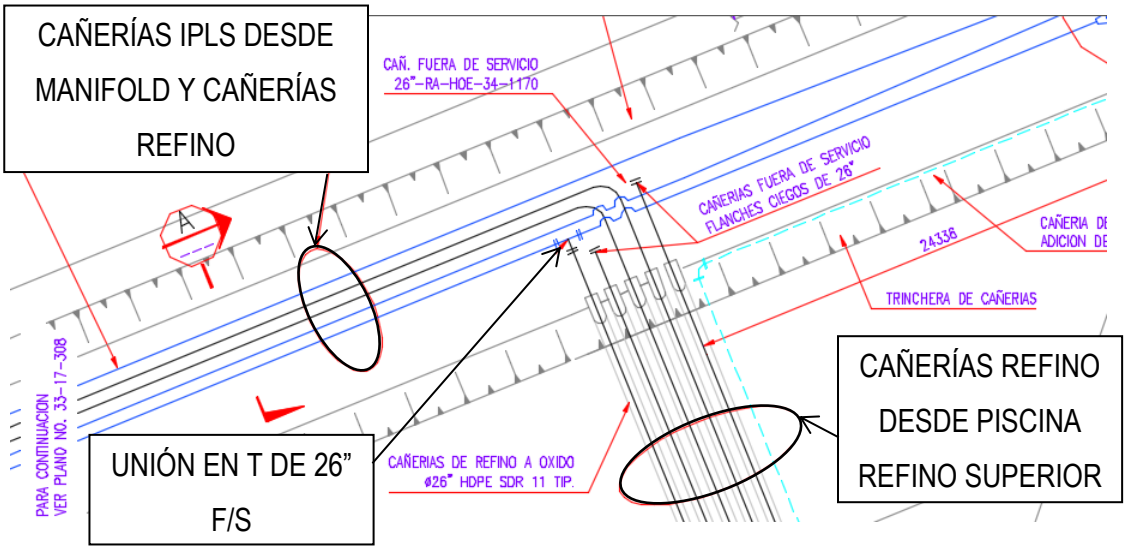


Figura 5.12. Ingreso líneas 1171 y 1172 al costado de la pila

La longitud de cada línea desde la bomba en la piscina de refino superior al costado de la pila es de 330 metros, al igual que para el riego anterior la longitud total dependerá del paño que se esté irrigando en ese momento según la operación. El flujo solicitado total es de 3600 [m^3/hr].

5.3.3 Configuración del sistema de riego

La configuración del sistema de riego sobre la pila dinámica tiene las siguientes características:

Al costado de la pila se encuentran 4 líneas de HDPE de 26", 2 de ellas de IPLS y 2 de solución de refino, cada una de estas líneas tiene una salida a cada ramificación cada 40 metros que se unen en un manifold que llaman "efe (F)" como se muestran en Figura 5.13 y Figura 5.14. Luego del manifold la línea que sube a la pila es de HDPE telescópica que va desde 8" a 3.5" de díametro.

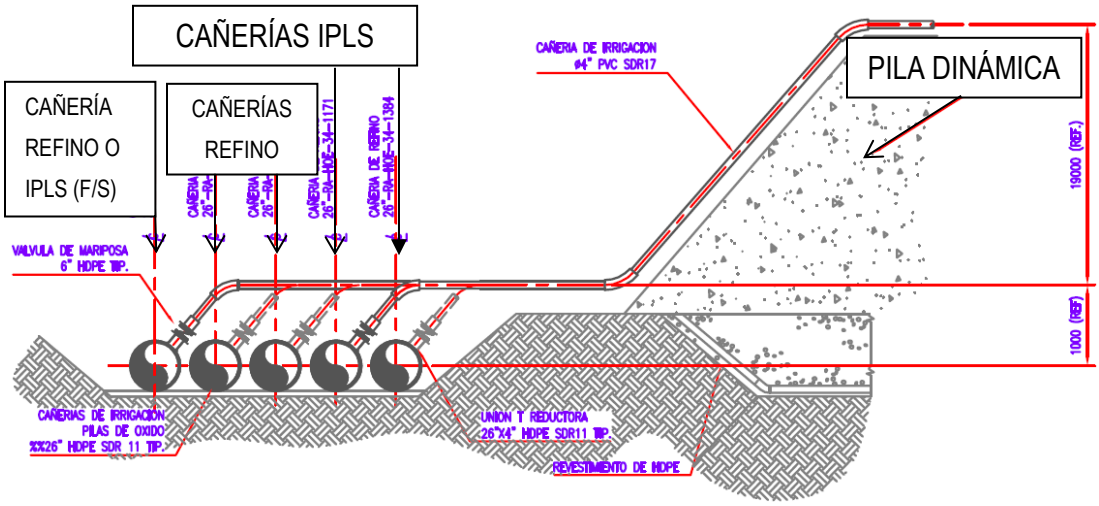


Figura 5.13. Cañerías de Irrigación hacia la pila

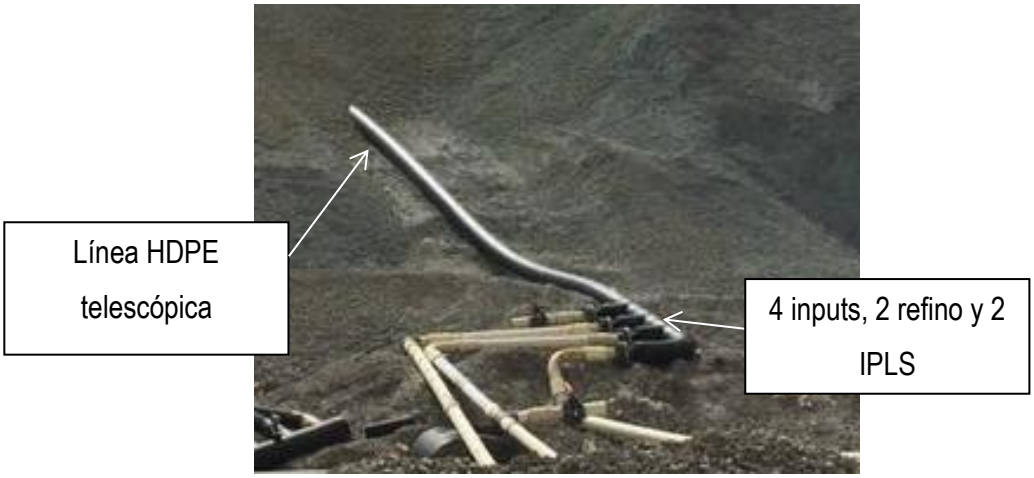


Figura 5.14. Unión efe a línea que va sobre la pila

Cada paño se compone de 8 **"Peines"**, cuya línea sub-principal es de HDPE de 2". En esta línea y cada 50 cm se encuentran instalados los laterales (HDPE de ½"), aquellos que tienen instalados los goteros (detalle en capítulo 5.9). La distancia entre goteros es de 50 cm como se muestra en Figura 5.15:

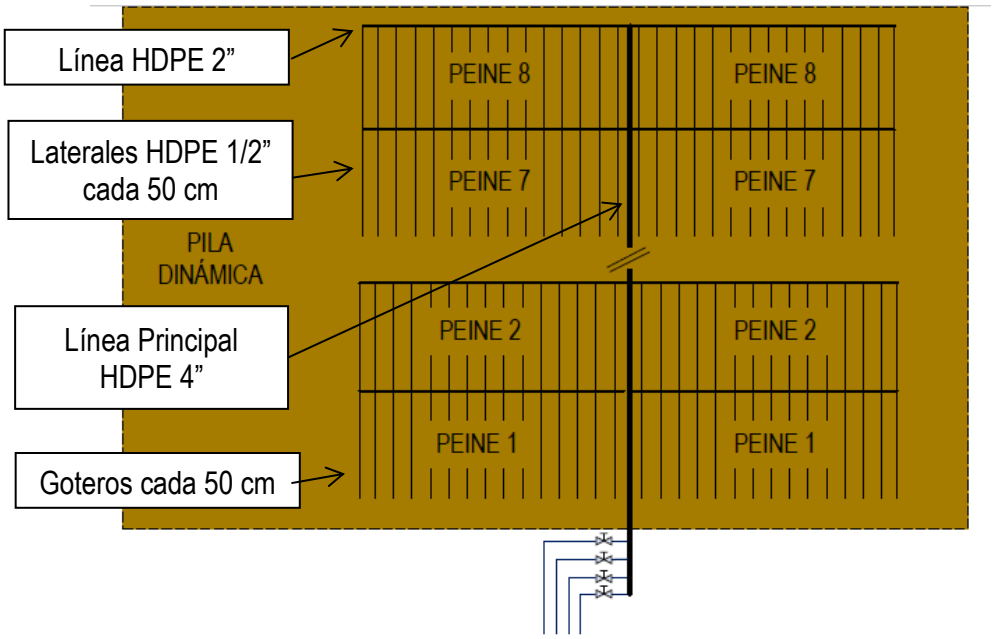


Figura 5.15. Configuración sistema de riego sobre pila dinámica

5.4 Riego Pila *Dump Leach*

El riego de esta pila se realiza con solución de refino, que es impulsado a la pila *Dump Leach* (DL) a través de tres (3) bombas modelo Hazleton 14 KL (datos técnicos en 5.8.2.1, página 76). El refino se encuentra almacenado en una piscina de 45.000 m3 de capacidad, denominada piscina DL (datos en Tabla 7). Esta solución en la piscina DL ha sido entregada a través de tres (3) bombas Hazleton modelo 14 KL desde la piscina de refino superior (datos en Tabla 8); cada una de ellas cuenta con una bomba centrífuga o *Booster* Vogel modelo CPR 300-250-600 en serie como se muestra en Figura 5.16.

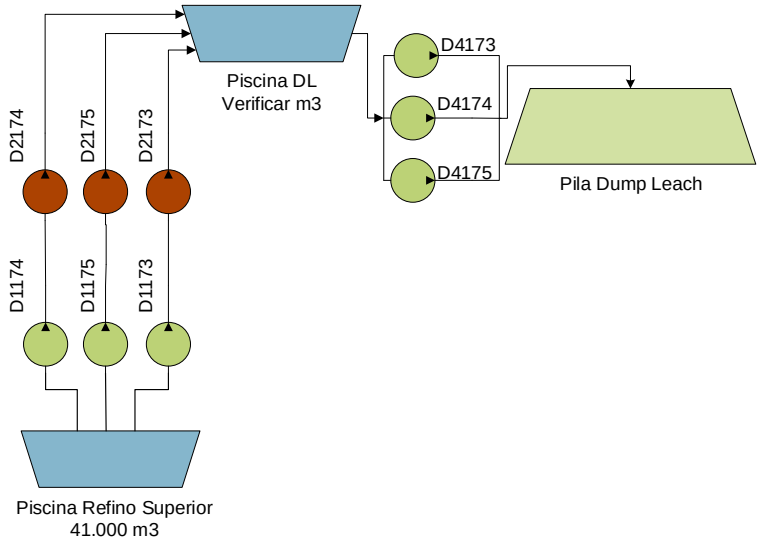


Figura 5.16. Diagrama de flujo riego pila DL

Por cada bomba sale una línea (en total 3) de HDPE de 26 pulgadas con un largo desde la bomba a la piscina DL de 2490 metros aproximadamente. La distancia entre la bomba en piscina de refino superior a la bomba *Booster* es de 1230 metros aproximadamente.

Tabla 7. Características Piscina DL

Característica	Valor	Unidad
Capacidad	45.000	[m^3]
Superficie	15.000	[m^2]
Altura geográfica	3300	[m]

La ubicación de las piscinas y bombas se muestra en Figura 5.17:

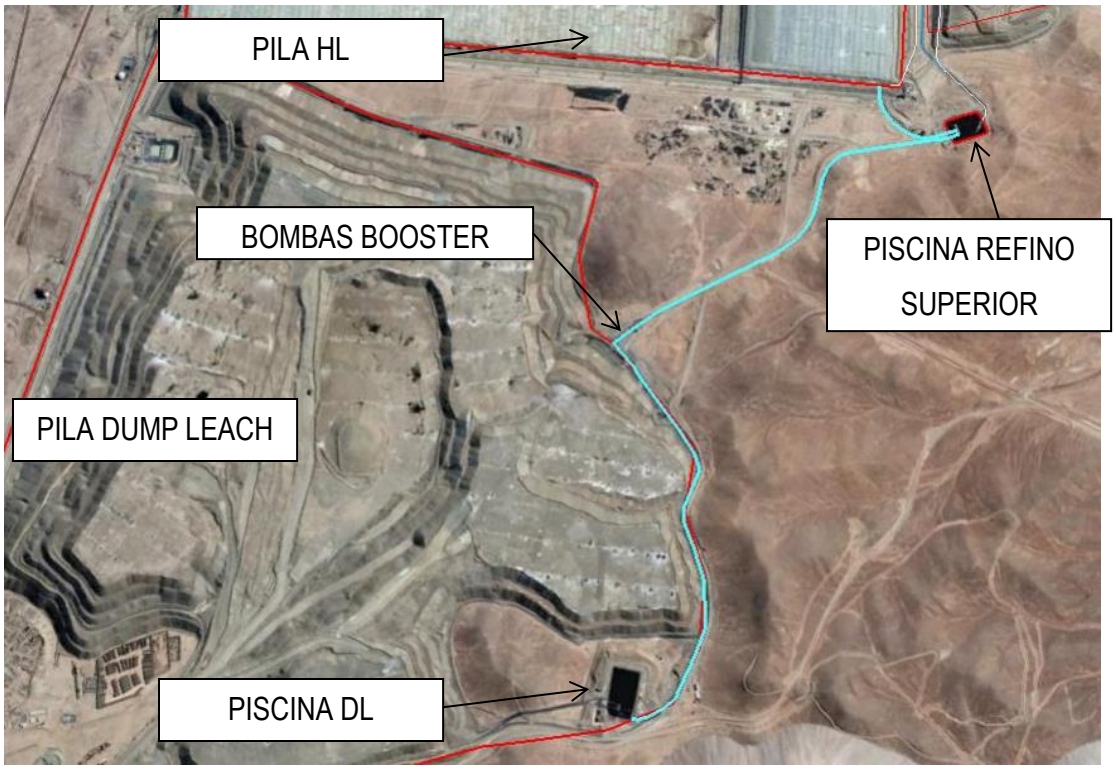


Figura 5.17. Piscinas refino superior y DL y ubicación bombas *Booster*

5.5 Riego Pila de Ripios

El riego de la pila de ripios se hace con solución desde la piscina de refino inferior (datos en Tabla 8) a través de una bomba Hazleton modelo 14 KL (bomba 1156) cuya función es la irrigación a la pila RAL y suministrar solución de refino a la piscina IPLS según sea necesario como se muestra en Figura 5.18.

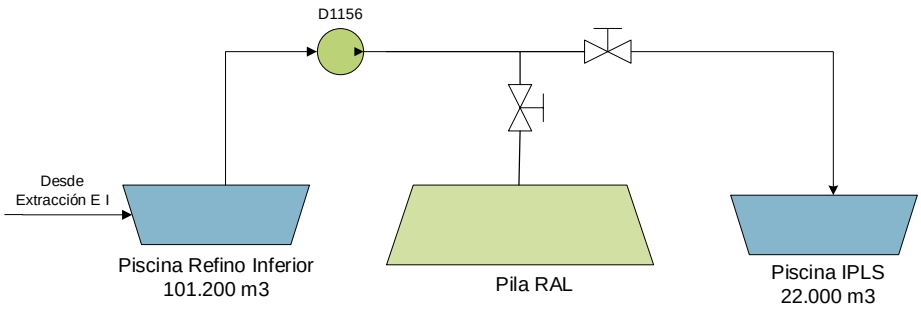


Figura 5.18. Diagrama Riego Piscina RAL

Tabla 8. Característica Piscina Refino Inferior

Característica	Valor	Unidad
Capacidad	108.000	[m^3]
Superficie	9000	[m^2]
Altura geográfica	3045	[m]

La línea desde la bomba es de material HDPE de 26”.

5.6 Recolección de Soluciones

La solución rica en cobre que ha percolado a través de la pila es conducida a través de tubos colectores que se ubican debajo de la pila a través de sifones (en el caso de la pila dinámica) a una canaleta principal que recibe la solución y según sea la concentración de cobre de esta solución se almacena en la piscina de PLS de 140.000 m^3 o en la piscina de solución IPLS de 22.000 m^3, este proceso es aplicable para las tres pilas de lixiviación activas. Ver Figura 5.19.

Figura 5.19. Obtención solución PLS – IPLS

La solución que ha percolado de la lixiviación de la pila de ripios es almacenada en una piscina denominada “Piscina RAL” de 16.500 m^3. La solución contenida en ella es impulsada a través de una (1) bomba modelo Hazleton G, que se encuentra instalada en balsa al igual que las anteriores ya mencionadas, hacia la piscina Auxiliar de 8.000 m^3 como se muestra en Figura 5.20 a través de una línea de HDPE de 26”.

Desde la piscina Auxiliar la solución es bombeada hacia la piscina de PLS o IPLS según sea el caso a través de una bomba modelo Hazleton G utilizando una línea de HDPE de 22”.

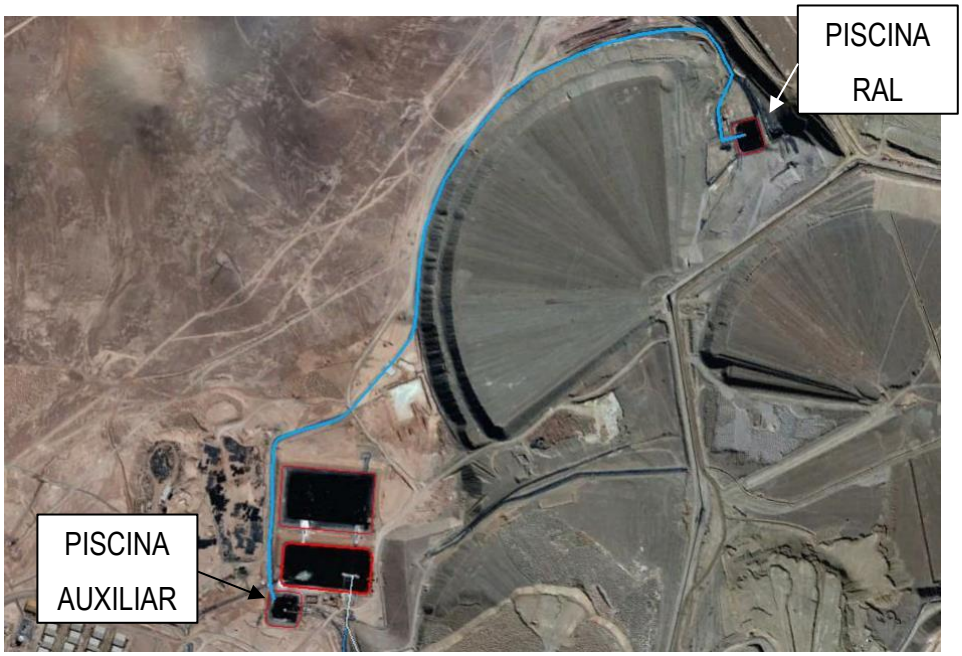


Figura 5.20. Piscina RAL y línea hacia piscina Auxiliar

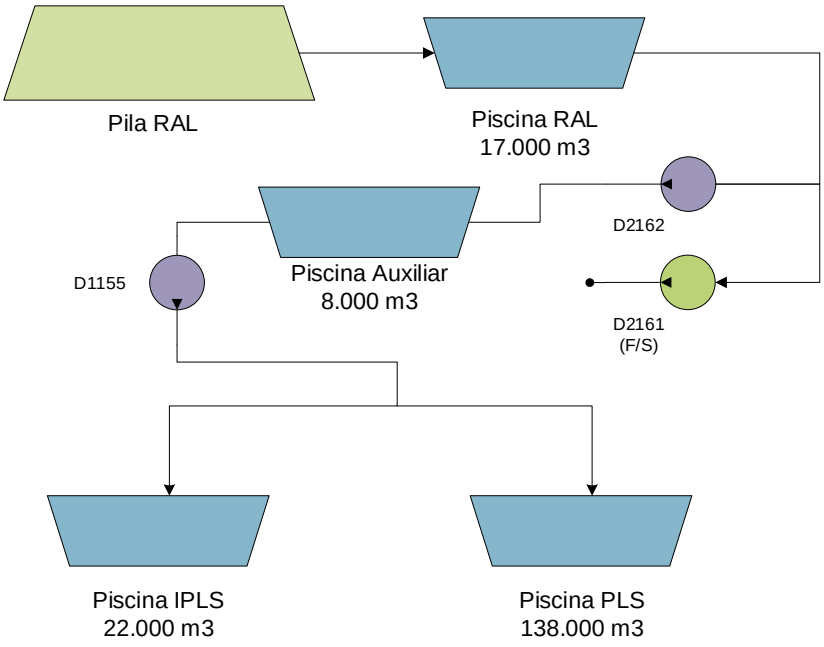


Figura 5.21. Diagrama general obtención solución desde lixiviación pila RAL

5.7 Extracción por solvente y Electro-obtención

Finalizado el proceso de lixiviación, con la obtención de PLS rica en cobre almacenada en la piscina respectiva, esta es enviada por gravedad hacia el proceso de extracción por solvente, dónde un solvente orgánico extrae el cobre de esta solución y luego lo entrega como electrolito rico. Este electrolito se hace circular en las celdas de electro-obtención de una de las 4 naves para luego de 4 a 5 días obtener los cátodos de cobre fino.

5.8 Bombas y motores

En este capítulo se presentan las bombas de las piscinas de lixiviación y sus características. Existen 3 tipos de bombas involucradas y 3 tipos de motores.

5.8.1 Motores

Existen tres (3) tipos de motores instalados junto a las bombas de las piscinas. Los tres trabajan a una velocidad nominal de 1490 [rpm] y tienen potencias de 670 [kW] y 810 [kW], sin variador de frecuencia ni partidor suave.

Los motores instalados son:

5.8.1.1 WEG HGF 450 C

Tabla 9. Datos nominales Motor WEG HGF 450 C

Marca	Capacidad [kW] / [HP]	Velocidad nominal [rpm]	Tensión [V]	Corriente [A]	Eficiencia [-]	Carcasa	F.S
WEG	670 / 898,485	1490	6.600	47,6	96,1	450	1,0

5.8.1.2 WEG HGF 450 E

Tabla 10. Datos nominales Motor WEG HGF 450 C

Marca	Capacidad [kW] / [HP]	Velocidad nominal [rpm]	Tensión [V]	Corriente [A]	Eficiencia [-]	Carcasa	F.S
WEG	670 / 898,485	1490	6.600	47,6	96,1	450	1,00

5.8.1.3 WEG HGR 450 C

Tabla 11. Datos nominales Motor WEG HGF 450 C

Marca	Capacidad [kW] / [HP]	Velocidad nominal [rpm]	Tensión [V]	Corriente [A]	Eficiencia [-]	Carcasa	F.S
WEG	810 / 1086,23	1490	6.600	47,6	96,1	450	1,00

5.8.2 Bombas

Se presenta la información de los datos nominales o de diseño de la bomba. Existen tres tipos de bombas que operan el proceso de lixiviación, estas son:

5.8.2.1 Hazleton 14 KL VNDM

a) Datos Nominales:

Tabla 12. Condiciones de Operación Bomba Hazleton 14 KL VNDM

Condiciones de Operación Diseño	
Caudal [m3/hr]	1500
TDH [feet] / [m]	394 / 120
RPM	1490
HP (Agua Clara)	801,4
Flujo Mínimo [m3/hr]	681
Diámetro Impulsor [pulg]	22,5 – 27
Material Impulsor	Titanio

b) Curva de rendimiento:

Las curvas de rendimiento para la familia de bombas se pueden encontrar en **Anexo C**.

5.8.2.2 Hazleton 14 G

a) Datos Nominales:

Tabla 13. Condiciones de operación bomba Hazleton 14G

Condiciones de Operación Diseño	
Caudal [m3/hr]	1300
TDH [feet] / [m]	345 / 105
RPM	1480
HP (Agua Clara)	631
Flujo Mínimo [m3/hr]	-
Diámetro Impulsor [pulg]	22,5 -27
Material Impulsor	Titanio

b) Curva de Rendimiento:

Las curvas de rendimiento se presentan en **Anexo D**.

5.8.2.3 Vogel CPR 300-250-600

Bomba centrífuga de flujo radial.

a) Datos nominales

Tabla 14. Condiciones de operación Vogel CPR 300-250-600

Condiciones de Operación Diseño	
Caudal [m3/hr]	826,7
TDH [feet] / [m]	117
RPM	1485
Potencia (Agua Clara) [kW]	337,8
Flujo Mínimo [m3/hr]	-
Diámetro Impulsor [mm]	592
Material Impulsor	254SMO - Acero Inoxidable Austenítico aleación Molibdeno

b) Curva de rendimiento

La curva de rendimiento se encuentra en Anexo E.

5.8.3 Desempeño

El desempeño en conjunto de las tres bombas sistemas (IPLS, REFINO y REFINO SUPERIOR – DL) para los meses de Diciembre, Enero y Febrero de esta piscina se muestra en Gráfico 5.1.

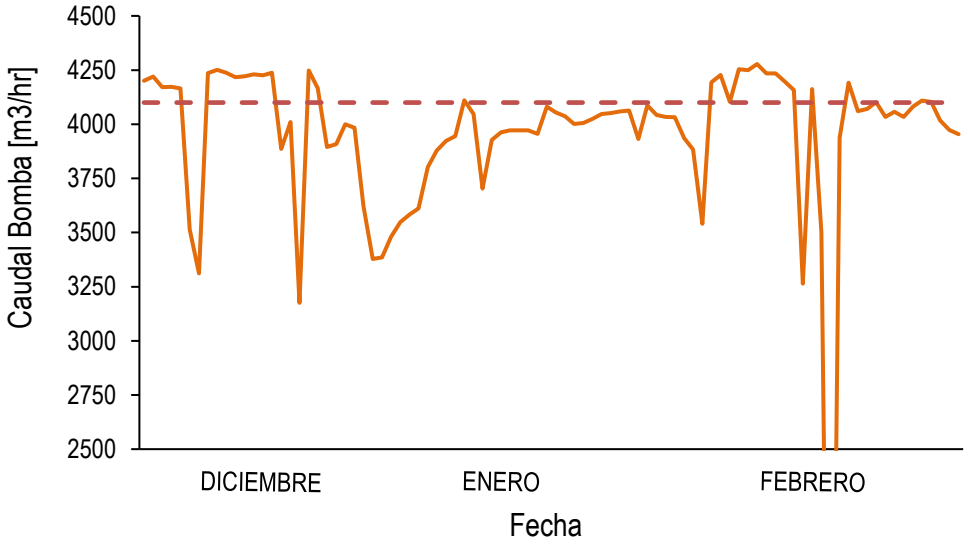


Gráfico 5.1. Desempeño Bombas 2001,2002,2004 en paralelo IPLS a Pila Dinámica.

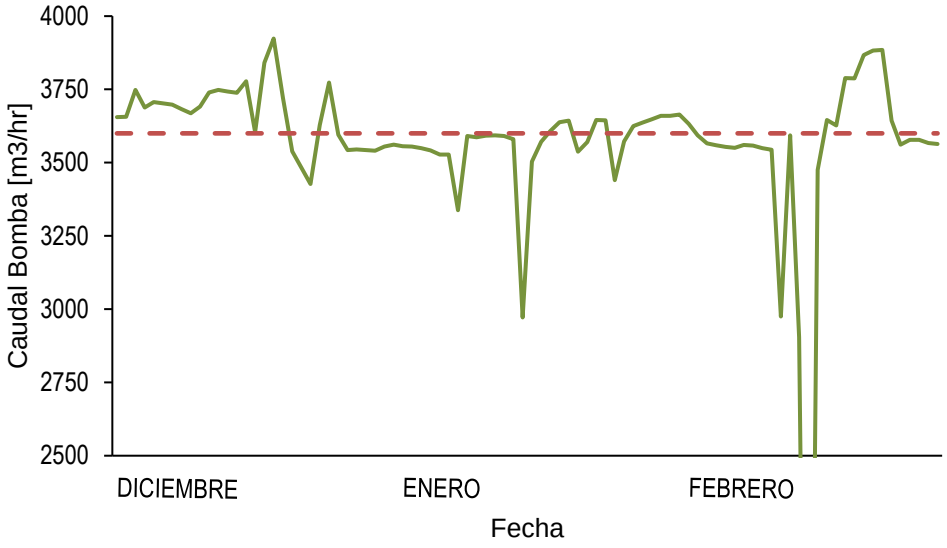


Gráfico 5.2. Desempeño bombas 1170,1171,1172 en paralelo; REFINO a Pila Dinámica.

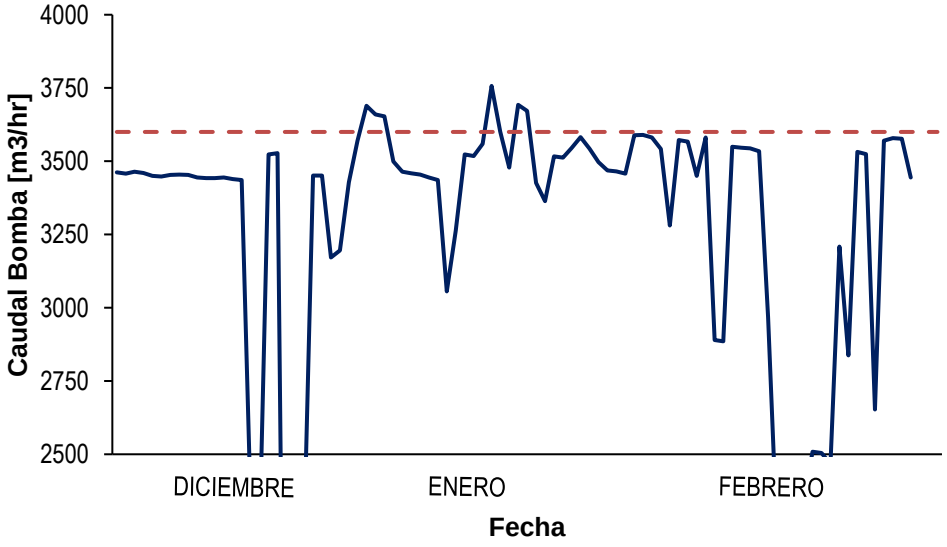


Gráfico 5.3. Desempeño bombas 1173,1174,1175 en paralelo; REFINO a Piscina DL.

5.9 Goteros

Como se dijo en capítulos anteriores el riego de la pila se realiza a través de emisores de tipo gotero. En particular actualmente se usa el gotero marca RIVULIS PLASTRO modelo HydroMine 16/35 – 1.6 lph cuya configuración se puede ver en Figura 5.22:

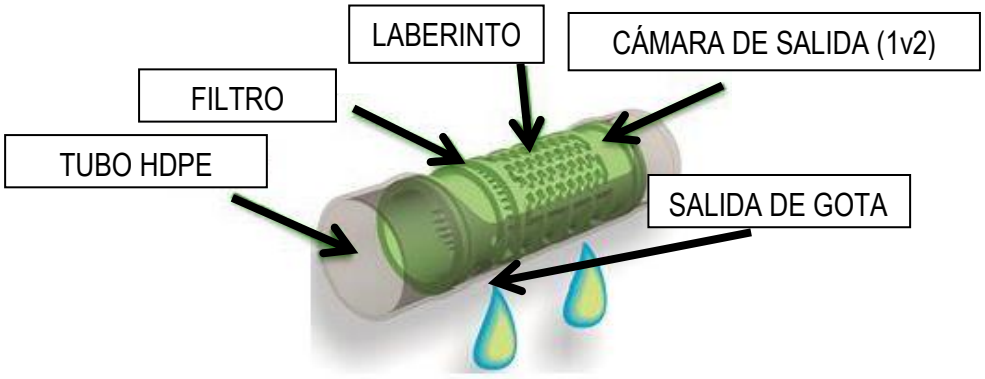
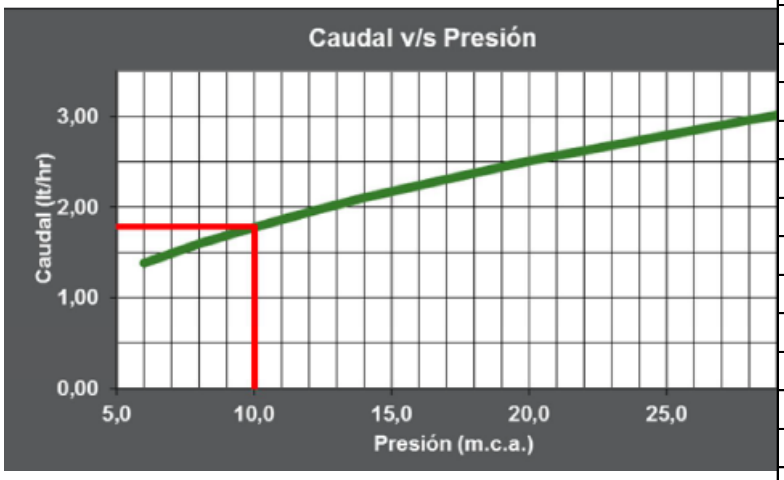


Figura 5.22. Gotero Rivulis Plastro Hydromine 16/35 – 1.6 lph

La curva de caudal versus presión que define el comportamiento de este emisor es:



Presión (mca)	Caudal lph
6	1,38
8	1,59
10	1,78
12	1,95
14	2,1
16	2,24
18	2,38
20	2,5
22	2,63
24	2,74
26	2,85
28	2,96
30	3,06

Figura 5.23. Gráfico caudal v/s presión emisor Hydromine 16/35 – 1.6 lph

Los valores de presión son entregados en mca; para facilitar los cálculos la conversión de esta presión en metro columna de refino (mcRef) se puede calcular como:

$$\mathrm{H}_{mca} = H_{mcRef}\frac{\rho_{ref}}{\rho_{agua}}$$

La tabla de la Figura 5.23 se expresa en mcRef en Tabla 15:

Tabla 15. Valores curva presión v/s caudal en mcRef

Presión (mcRef)	Caudal lph	Presión (mcRef)	Caudal lph
4,61	1,38	15,35	2,5
6,14	1,59	16,89	2,63
7,68	1,78	18,42	2,74
9,21	1,95	19,955	2,85
10,75	2,1	21,49	2,96
12,28	2,24	23,03	3,06
13,82	2,38	15,35	2,5

Para realizar cualquier análisis sobre este emisor, es importante obtener desde la curva caudal versus presión entregada por el fabricante la ecuación de la curva de forma potencial como se definió en la ecuación (Ec. 19) del capítulo 4.4. Se realiza este proceso en *Excel* y se obtiene la siguiente curva del Gráfico 5.4:

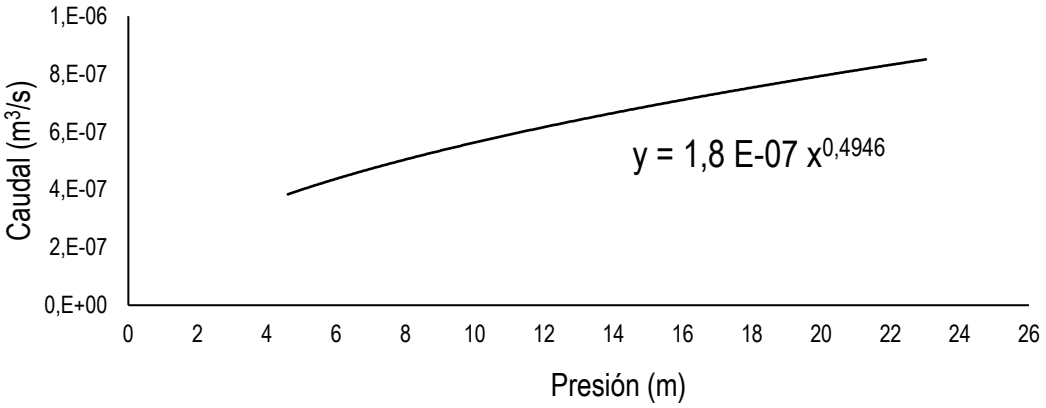


Gráfico 5.4. Curva de presión v/s Caudal Gotero Hydromine 16/35

Por lo tanto, los parámetros obtenidos para la ecuación de descarga del emisor de la forma $q = \alpha \cdot H^{y}$ son $\alpha = 1{,}8E - 7$ e $y = 0{,}4946$.

5.10 Geometría pila dinámica

La pila dinámica tiene una configuración como se muestra en Figura 5.24. La vista desde Sur a Norte que se muestra en A-A en Figura 5.25 se ha aproximado a un crecimiento lineal ya que no se tiene certeza de qué configuración sigue. La vista desde Este a Oeste o B-B se muestra en Figura 5.26:

Figura 5.24. Pila dinámica o HL y vistas A-A y B-B

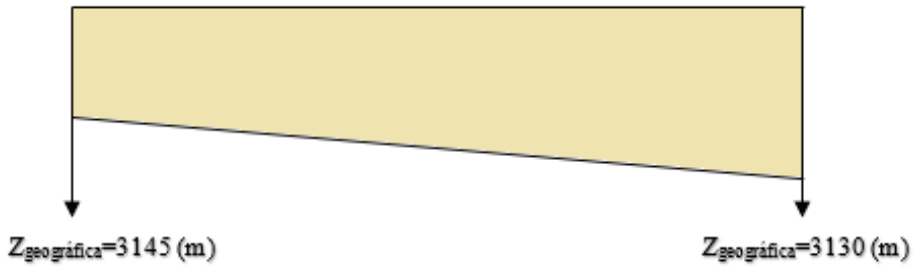


Figura 5.25. Vista A-A pila dinámica

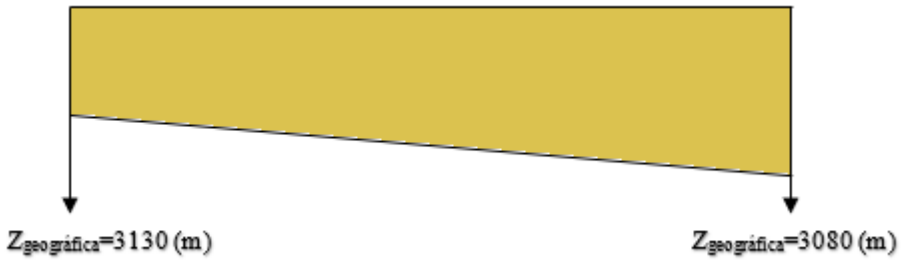


Figura 5.26. Vista B-B pila dinámica

6 ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL SISTEMA Y FUNCIONAMIENTO ACTUAL

Para la determinación del desempeño actual del sistema de irrigación de solución se utiliza el modelo de volumen de control presentado en capítulo 4.5. El desarrollo y estudio de este sistema se presenta a continuación.

6.1 Definición del sistema para método volumen de control

La notación usada en los siguientes capítulos se muestra en Figura 6.1, donde cada ramificación se denomina como R1, R2, …, Rn.

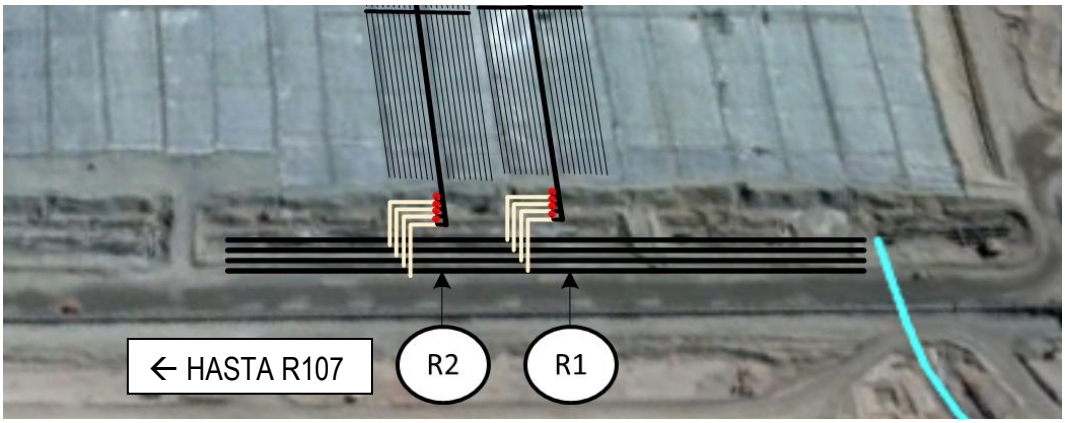


Figura 6.1. Diagrama Sistema riego pila dinámica

Cada línea que sale como ramificación Rn (para n desde 1 a 107) desde las 4 líneas de HDPE provenientes de IPLS y REFINO para el riego sobre la pila está compuesta por una línea principal de HDPE de configuración telescópica que posee otras ramificaciones de HDPE de 2” a una distancia aproximada de 78 metros desde los cuales nace cada uno de los ocho peines. A lo largo de esta tubería de 2” de 20 metros y cada 50 cm de distancia salen los **laterales**, tuberías de HDPE de ½” en los que se encuentran instalados cada 50 [cm] goteros Marca RIVULIS PLASTRO modelo HydroMine 16/35 – 1,6 lph. Para este modelo se consideran 150 emisores o goteros

por cada lateral, 40 laterales por cada peine y como se ha dicho anteriormente 8 peines por cada paño y 2 paños por cada ramificación Rn.

Para determinar la presión necesaria (H_{L1max}, H_{L2max}, …, H_{L40max}) se usa el método del volumen de control, cuya base está en las ecuaciones de conservación de masa y energía aplicado a un volumen de control y resuelto usando el procedimiento *back step* o paso anterior. El primer volumen de control se elige al final del último lateral (H_{Lmin40}) para determinar así, la presión al principio del lateral (H_{Lmax40}) y considerar la pérdida por fricción para determinar la presión máxima del lateral anterior (H_{Lmax39}) y así consecutivamente hasta encontrar el valor inicial de presión al comienzo de cada peine (H_{Lnmax}). Siguiendo la nomenclatura del método, en este caso los parámetros (a,α,A,Δx,etc) de este sistema se muestran en Tabla 16:

Tabla 16. Datos Laterales Sistema Irrigación Actual

Parámetro	Valor	Unidad
Di Lateral = D	12	[mm]
Área Lateral = A	2,01E-4	[m2]
Δx	0,5	[m]
K	5,88	[-]
C	150	[-]
m	1,852	[-]
a (A,K,C,m)	0,078753	[-]
α	1,58E-7	[-]

y	0,4946	[-]
NL (n° emisores por lateral)	44	[-]

Para realizar este proceso iterativo utilizando el método de Euler (capítulo 4.6) la ecuación vectorial que define este sistema se obtiene como:

Dada las ecuaciones diferenciales parciales (Ec. 26) y (Ec. 27) que definen el sistema, para este diseño son:

$$(1)\frac{\partial V}{\partial X} = \frac{\alpha}{A\Delta x}H^{y} = \frac{1{,}58E-7}{2{,}01E-4\cdot 0{,}5}H^{0{,}5} = 0{,}001\cdot H^{0{,}5}\ ; \qquad V(x_0) = 0$$

$$(2)\ \frac{\partial H}{\partial X} = aV^{m} - \frac{\alpha}{Ag\Delta x}VH^{y}$$

$$= 0{,}078753\cdot V^{1{,}852} - \frac{1{,}58E-7}{2{,}014E-4\cdot 9{,}81\cdot 0{,}5}V\cdot H^{0{,}5}$$

$$= 0{,}00836\cdot V^{1{,}852} - 0{,}0001\cdot V\cdot H^{0{,}5} H(x_0) = H_{min}$$

Reemplazando y realizando las operaciones matemáticas, el sistema de ecuaciones queda definido como:

$$(1)\ \frac{\partial V}{\partial X} = 0{,}001\cdot H^{0{,}5}\ ;\ V(x_0) = 0$$

$$(2)\ \frac{\partial H}{\partial X} = 0{,}00836\cdot V^{1{,}852} - 0{,}0001\cdot V\cdot H^{0{,}5} \qquad H(x_0) = H_{min}$$

Con este sistema de ecuaciones se obtienen los resultados que se presentan en las etapas posteriores.

6.2 Definición de parámetros del sistema

Para el análisis de desempeño se seguirán los siguientes puntos:

i. Cantidad de paños que se espera se rieguen con una solución determinada con el Caudal y Presiones solicitado por paño.
ii. 2 escenarios de satisfacción para punto (i): a) días aleatorio b) paños promedio al extremo más lejano de la pila.

El análisis de cantidad de paños que se esperan que sean regados por el sistema con solución IPLS y Refino considera los datos obtenidos desde Enero 2017 a Abril 2018 desde los cuales se puede obtener los indicadores presentados en Tabla 17:

Tabla 17. Datos Paños regados IPLS & REFINO

	IPLS	REFINO
Número de paños Máximo	49	48
N° días	1	2
Segundo Máximo de paños	48	46
N° días	7	27
Tercer máximo de paños	47	44
N° días	9	60
Promedio	42	40

Los caudales por paño y ramificación están vinculados con las tasas de riego nominales solicitadas por solución. Recordemos que 1 ramificación riega 2 paños, por lo que los caudales solicitados por ramificación se pueden calcular como:

$$\text{REFINO} \rightarrow \frac{Qent}{12700 \cdot 2} = 6\ lph \rightarrow Qent = 153 \left[\frac{m^3}{hr}\right]$$

$$\text{IPLS} \rightarrow \frac{Qent}{12700 \cdot 2} = 8\ lph \rightarrow Qent = 204 \left[\frac{m^3}{hr}\right]$$

El método de control de estos flujos se realiza de forma diaria por uno o más operadores con el apoyo de un flujómetro magnético con el cual regulan a través de las válvulas de bola de la unión EFE el caudal entrante (ver Figura 5.14, página 66).

Establecido los caudales anteriores es posible determinar las presiones requeridas para obtener estos flujos según la modelación de sistemas de irrigación a través del modelo del volumen de control [10]. Para los flujos de solución IPLS y REFINO los modelos ideales de presión se presentan en Tabla 18 y Tabla 19 respectivamente:

Tabla 18. Parámetros en cada peine de ramificación Q_{sol}=204 m3/hr IPLS

N° Peine	Qent Peine (m^3/s)	Q Línea 4" (m3/s)	L (m)	Re	Pérdida (mcRef)	Tasa de Riego (lph/m^2)	Hn máx entrada Peine (mcRef)
8	1,495E-03	0,0030	78	4,35E+04	1,554	3,39	8,07
7	3,06E-03	0,0091	78	9,55E+04	1,195	6,93	8,46
6	3,16E-03	0,0154	78	1,62E+05	2,625	7,17	9,05
5	3,42E-03	0,0223	78	2,34E+05	4,766	7,75	10,58
4	3,86E-03	0,0300	78	2,81E+05	4,579	8,76	13,54
3	4,26E-03	0,0385	78	2,81E+05	2,102	9,65	16,49

2	4,43E-03	0,0474	78	3,11E+05	1,820	10,05	17,88
1	4,58E-03	0,0565	78	3,29E+05	1,800	10,38	19,09
0		0,0565	8	3,29E+05	0,250		29,61
		204 (m3/hr)					29,132

Tabla 19. Parámetros en cada peine de ramificación Q_{sol}=153 m3/hr IPLS

N° Peine	Qent Peine (m^3/s)	Q Línea 4" (m3/s)	L (m)	Re	Pérdida (mcRef)	Tasa de Riego (lph/m^2)	Hn máx entrada Peine (mcRef)
8	1,10E-03	0,0022	78	3,23E+04	0,23	2,49	4,41
7	2,27E-03	0,0068	78	7,09E+04	0,35	5,15	4,64
6	2,35E-03	0,0115	78	1,20E+05	0,89	5,34	4,99
5	2,55E-03	0,0166	78	1,74E+05	1,73	5,79	5,88
4	2,90E-03	0,0224	78	2,10E+05	1,73	6,58	7,62
3	3,21E-03	0,0288	78	2,10E+05	0,82	7,29	9,35
2	3,35E-03	0,0355	78	2,33E+05	0,72	7,60	10,17
1	3,47E-03	0,0424	78	2,47E+05	0,56		10,89
0		0,0424	8	2,47E+05	0,058		11,45
		153 m3/hr					20,512

Para determinar el desempeño del sistema actual de riego con solución *IPLS* y Refino en un día al azar, se considera la configuración del día 25 de febrero que se presenta en Anexo F con la finalidad de considerar las 3 bombas del sistema de REFINO bajo la

misma carga demandada (al solo llegar la irrigación de *IPLS* hasta el paño 48, 42 paños).

Con estos valores de caudal entrante y la configuración presentada es posible calcular la distribución de caudal y presión para los escenarios a analizar en los siguientes capítulos.

6.3 IPLS - Pila Dinámica

Según lo presentado en 5.3.1 la curva de desempeño de las 3 bombas en paralelo, 2 Hazleton 14KL 25T y 1 14KL 24.125T se obtiene como:

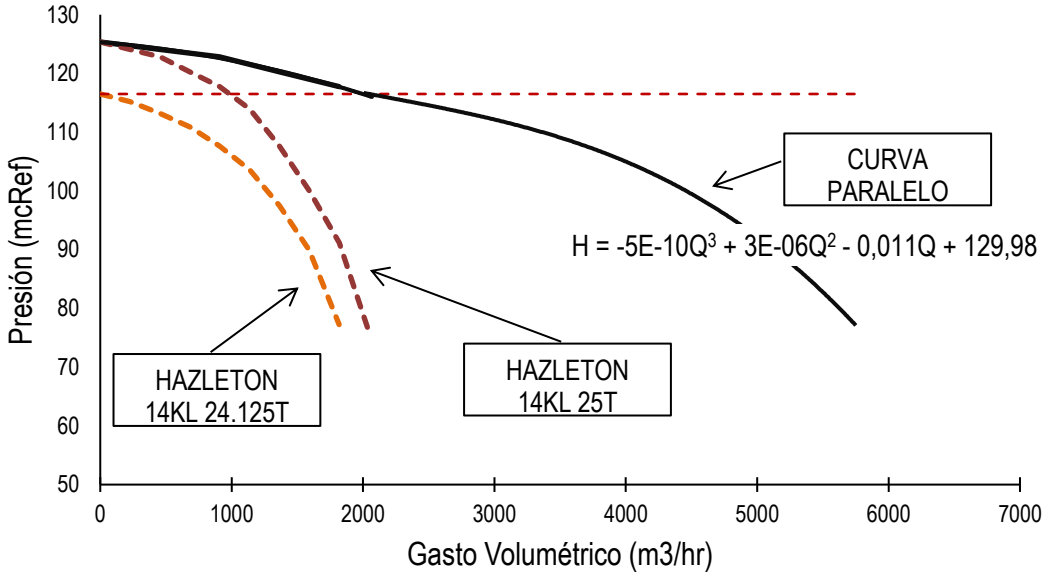


Gráfico 6.1. Curva de desempeño paralelo Hazleton 14KL 25T (X2) + 14KL 24.125T

6.3.1 Situación Actual

Para la configuración del día 25 de febrero que se presenta en Anexo F la irrigación con solución *IPLS* se extiende hasta el paño 86 con totalidad de 40 paños. El caudal

registrado para este día en paralelo fue de 4103 m^3/hr cuyo valor de presión total dinámica corresponde a 100,5 mcRef (según Gráfico 6.1); con este valor es posible determinar los valores de caudal para cada bomba como:

Hazleton 14KL 25T = 1490 m^3/hr (X2 en paralelo manifold)

Hazleton 14KL 24.125T = 1123 m^3/hr

Para poder calcular la pérdida por fricción se utiliza una tubería equivalente como:

$$\sqrt{\frac{{D_e}^5}{1330}} = \sqrt{\frac{26^5}{1330}} + \sqrt{\frac{26^5}{1330}} \rightarrow D_e = 34{,}3''\ SDR11$$

De esta manera la pérdida por fricción hasta la primera ramificación y la presión en ese punto se obtiene como:

Hinicial (m)	Caudal (m3/hr)	Velocidad (m/s)	f (-)	L (m)	D (m)	Re	Pérdida (m)
125,4	4103	2,85671	0,0104	1330	0,712724	2036045	5,05

Obtenida la pérdida por fricción es posible calcular la presión de entrada al comienzo de la ramificación como:

$$\overset{P_{atm}}{\cancel{\frac{H_1}{\rho g}}} + \overset{0}{\cancel{\frac{{V_1}^2}{2g}}} + z_1 + H_{nec} = \frac{H_2}{\rho g} + \frac{{V_2}^2}{2g} + z_2 + h_L$$

$$H_2 = (z_1 - z_2) + H_{nec} - \frac{{V_2}^2}{2g} - h_L$$

$$H_2 = \big(3080 - (3130 + 0{,}86)\big) + 100{,}5 - \frac{2{,}8567^2}{2 \cdot 9{,}81} - 5{,}05$$

$$H_2 = 44{,}2\ mcRef$$

Con este valor de presión en la primera ramificación a la que se entrega solución IPLS es posible encontrar los valores de presión y por ende el caudal de las siguientes ramificaciones como se muestra en Tabla 20:

Tabla 20. Parámetros para cada ramificación IPLS

Rn	L(x) (m)	Altura (m)	Q_{ent} Ramif. (m3/hr)	Q línea principal (m3/hr)	L (m)	Perdida (mcRef)	P_{Rn} (mcRef)
1	100	0,65	204	3899	880	4,85	44,20
2	980	6,41	204	3695	40	0,20	33,59
3	1020	6,67	204	3491	40	0,18	33,13
:	:	:	:	:	:	:	:
18	1620	10,60	196	432	40	0,0040	28,05
19	1660	10,86	195	238	40	0,0013	27,78
20	1700	11,12	193	44	40	0,0001	27,52

Caudal promedio: 201,77 m^3/hr, Presión Promedio: 30,95 mcRef

Parámetros del sistema como el coeficiente de uniformidad del caudal entrante, coeficiente de uniformidad de presión y caudal entrante por ramificación se obtiene como:

Coeficiente de uniformidad de caudal:

$\sigma = 3{,}645$ (desviación estándar)

$C_{vq} = \frac{3{,}645}{201{,}77} = 0{,}0181 \rightarrow C_{uq} = 100(1 - 0{,}0258) = 98{,}2\ \%$

Coeficiente de uniformidad de Presión:

$\sigma = 1{,}507$ (desviación estándar)

$$C_{vH} = \frac{1{,}507}{30{,}95} = 0{,}0487 \rightarrow C_{uq} = 100(1 - 0{,}0258) = 95{,}13\ \%\ \%$$

Si graficamos los resultados obtenidos de caudal y presión obtenemos:

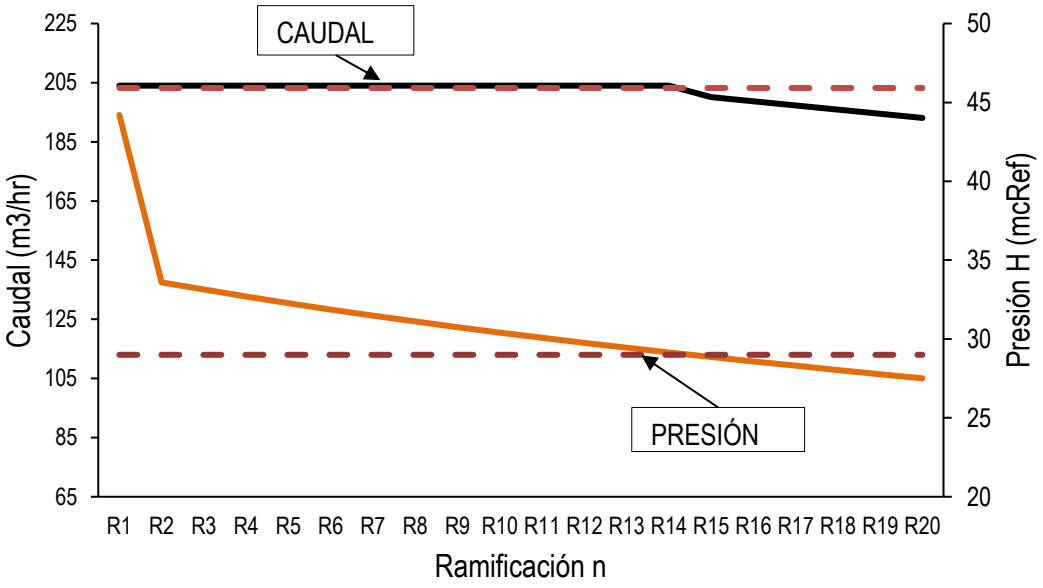


Gráfico 6.2. Caudal entrante por ramificación

Se puede notar que debido a las pérdidas de presión en la ramificación R15 la presión cae de 29 mcRef afectando así al caudal admitido por el sistema haciéndolo bajar de los 204 m3/hr por ramificación.

En cuanto a la distribución de caudal o tasa de riego y presión dentro de cada peine de un paño se observa lo siguiente:

Coeficiente de uniformidad de caudal:

$\sigma = 6{,}05E - 4$ (desviación estándar)

$$C_{vq} = \frac{6{,}05E-4}{3{,}72E-3} = 0{,}163 \rightarrow C_{uq} = 100(1 - 0{,}163) = 83{,}74\%\ \%$$

Coeficiente de uniformidad de Presión:

$\sigma = 4{,}17$ (desviación estándar)

$$C_{vH} = \frac{4{,}17}{12{,}87} = 0{,}32 \rightarrow C_{uq} = 100(1 - 0{,}32) = 67{,}6\ \%\ \%$$

Si graficamos los resultados obtenidos de caudal y presión obtenemos:

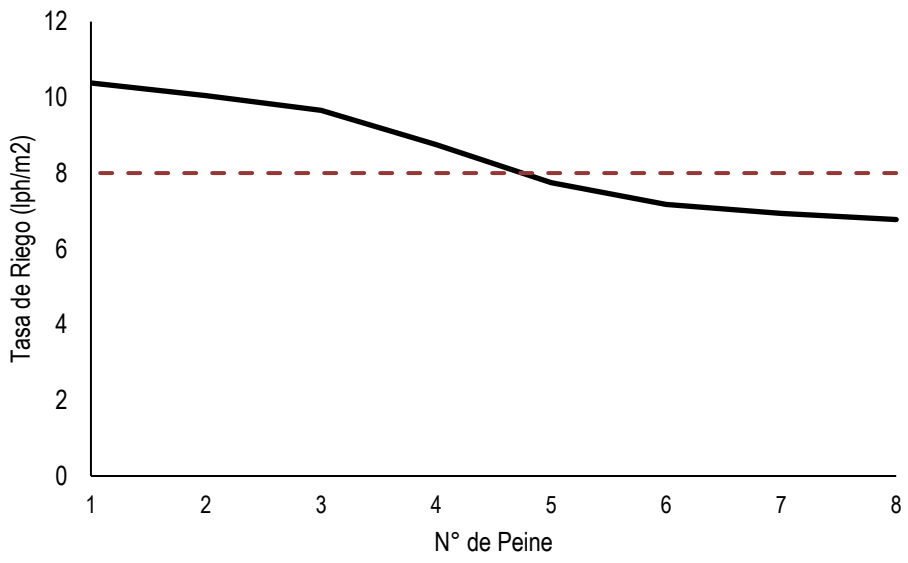


Gráfico 6.3. Tasa de riego por peine (lph/m^2)

La variación por debajo de la línea de TR=8 lph/m^2 es atribuible al sobre-riego sobre los paños 1, 2 y 3 dado por la sobrepresión a la entrada de cada peine como se muestra en el siguiente gráfico.

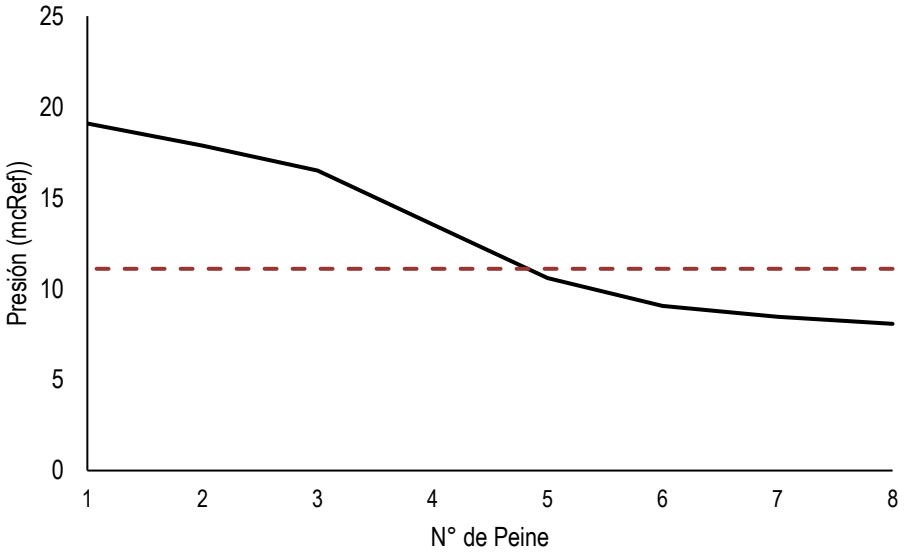


Gráfico 6.4. Presión de entrada por peine (mcRef)

La gran variación de presiones dentro de cada paño entre peines es atribuible a la no regulación de las válvulas de entrada de cada uno de estos por falta de tiempo y HH.

Una regulación mejor sobre las presiones de entradas de cada peine implicaría en aumento del coeficiente de uniformidad del paño completo en cuanto a tasa de riego que tiene implicancia además en la cinética metalúrgica del paño de lo que hablaremos más adelante.

6.3.2 Sistema ideal

En base a las condiciones operacionales que se esperan del sistema, considerando el número de paños promedio irrigados con solución de IPLS que corresponde a 42 paños, es decir 21 ramificaciones, que los paños regados son los más críticos (últimos paños) y que la presión en la última ramificación sea de al menos 29 mcRef. El sistema ideal en presiones y caudal se muestra en Tabla 21: (*se consideran 40 m3/hr de pérdida)*

Tabla 21. Valores de presión y caudal ideales sistema IPLS

Rn	L(x)	Altura (m)	Q_{ent} Ramificación (m3/hr)	Caudal 2002 m3/hr	Pérdida (mcRef)	Pn (mcRef)
20	2060	13,5	204	244	0,0013	29,0
19	2020	13,2	204	448	0,0014	29,3
18	1980	13,0	204	652	0,0042	29,5
:	:	:	:	:	:	:
3	1380	9,0	204	3712	0,1813	34,5
2	1340	8,8	204	3916	0,2013	34,9
1	1300	8,5	204	4120	0,2221	35,4
0					12,43	

$$\frac{\overset{P_{atm}}{\cancel{H_1}}}{\rho g} + \frac{\overset{0}{\cancel{V_1^2}}}{2g} + z_1 + H_{nec} = \frac{H_2}{\rho g} + \frac{V_2^{\,2}}{2g} + z_2 + h_L$$

$$H_{nec} = H_2 + \frac{V_2^{\,2}}{2g} + h_L + (z_2 - z_1)$$

$$H_{nec} = 35{,}4 + \frac{2{,}87^2}{2 \cdot 9{,}81} + 14{,}5 + (3130 - 3080 + 8{,}5)$$

$$H_{nec} = 110\ mcRef$$

Entonces, es necesario que el sistema sea capaz de impulsar a una altura de cabeza de 110 mcRef 4120 m^3/hr. Para esta altura de cabeza según Gráfico 6.1 se obtiene un caudal en paralelo de 3100 m^3/hr aproximadamente, por lo tanto, el sistema no es capaz de soportar la demanda al caudal solicitado en este escenario.

Para poder alcanzar esta altura de cabeza con el caudal necesario lo más factible de aplicar es un aumento en el diámetro del impulsor de las bombas, esto se analizará en el capítulo 7.1.

6.4 Refino Superior – Pila HL

6.4.1 Situación Actual

Para determinar las características del sistema actual, se considera la configuración del día 25 de febrero que se presenta en Anexo F con la finalidad de considerar las 3 bombas bajo la misma carga demandada por el sistema (al solo llegar la irrigación de refino hasta el paño 48, 42 paños). El caudal registrado para este día en paralelo fue de 3578 [m^3/hr] cuyo valor de presión total dinámica en este punto de operación según la curva de desempeño que se muestra en capítulo 5.3.2 es de 90 mcRef. Obtenido este valor es posible determinar que los flujos para cada bomba son:

Hazleton 14KL 22.5T = 1065 m^3/hr (X2 en paralelo manifold)

Hazleton 14G 22.5T = 1474 m^3/hr

De la misma forma anterior para calcular la presión de entrada a la primera ramificación se calcula un diámetro equivalente, la pérdida por fricción y a través de la ecuación de Bernoulli determinar la presión de entrada arriba de la pila para cada ramificación. El diámetro equivalente sigue la misma configuración del sistema IPLS (mostrada en página 91), por lo que este será de $D_e = 34{,}3"\ SDR11$. De esta forma la pérdida por fricción hasta la ramificación R1 es de:

Hinicial (m)	Caudal (m3/hr)	Velocidad (m/s)	f (-)	L (m)	D (m)	Re	Pérdida (m)
90	3578	2,49	0,01059	410	0,713	1775292	1,93

Obtenida la pérdida por fricción es posible calcular la presión de entrada al comienzo de la ramificación como:

$$\overset{P_{atm}}{\cancel{\frac{H_1}{\rho g}}} + \overset{0}{\cancel{\frac{V_1^2}{2g}}} + z_1 + H_{nec} = \frac{H_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_L$$

$$H_2 = (z_1 - z_2) + H_{nec} - \frac{V_2^2}{2g} - h_L$$

$$H_2 = \big(3143 - (3130 + 0{,}92)\big) + 90 - \frac{2{,}49^2}{2 \cdot 9{,}81} - 1{,}93$$

$$H_2 = 99{,}80\ mcRef$$

Con este valor de presión en la primera ramificación con REFINO de este día es posible encontrar los valores de presión y por ende el caudal de las siguientes ramificaciones como se muestra en

Así mismo es posible obtener el presión y caudal entrante para cada ramificación Rn como:

Tabla 22. Parámetros para cada ramificación REFINO

Rn	L(x)	Altura (m)	Q_{ent} Ramif. (m3/hr)	Q línea principal (m3/hr)	L (m)	Pérdida (mcRef)	P_{Rn} (mcREf)
1	140	0,92	168	3410	40	0,17	99,80
2	180	1,18	168	3241	40	0,16	99,37
3	220	1,44	168	3073	40	0,14	98,95

:	:	:	:	:	:	:	:
19	860	5,63	168	377	40	0,0031	93,78
20	900	5,89	168	209	40	0,0011	93,51
21	940	6,15	168	40	40	0,0001	93,25

En este caso consideramos, debido a la alta presión en cada uno de los puntos, que el caudal inicial de 3578 (m3/hr) se ha distribuido de forma uniforme sobre cada una de las ramificaciones con una pérdida estimada de 40 (m3/hr). Se obtiene un caudal promedio $Q_{prom\text{-}REF}$: 168 (m3/hr) y presión promedio $H_{prom\text{-}REF}$: 96,38 (mcRef).

Los parámetros del sistema, coeficiente de uniformidad de caudal y presión se obtienen como:

Coeficiente de uniformidad de caudal:

$\sigma = 0$ (desviación estándar)

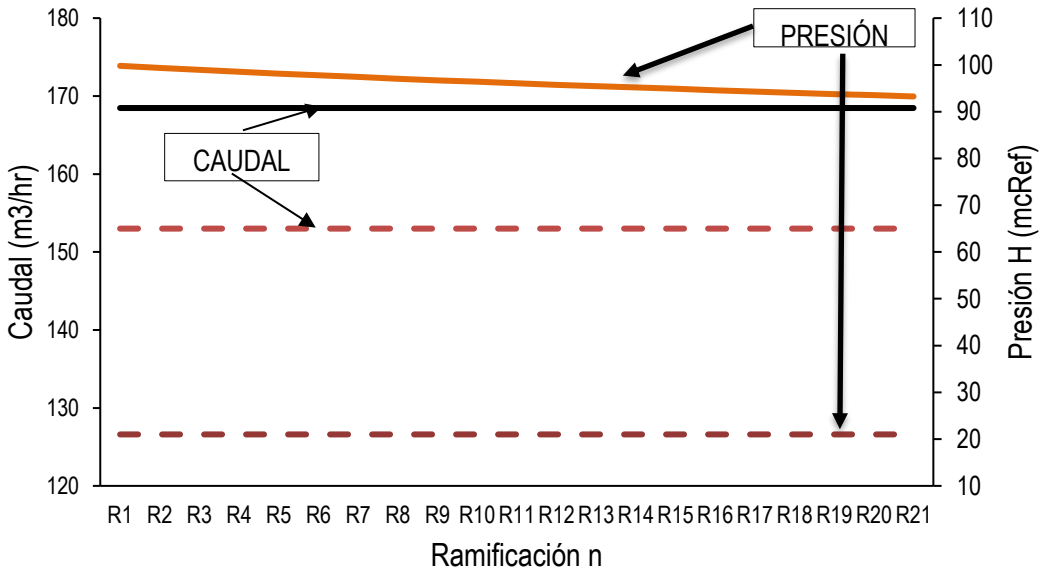
$C_{vq} = 0 \rightarrow C_{uq} = 100\%\ \%$

Coeficiente de uniformidad de Presión:

$\sigma = 1{,}277$ (desviación estándar)

$C_{vH} = \frac{1{,}277}{96{,}39} = 0{,}0133 \rightarrow C_{uq} = 100(1 - 0{,}0133) = 98{,}67\ \%\ \%$

Si graficamos los resultados obtenidos de caudal y presión obtenemos:



Se puede notar que, gracias a la alta presión de cabeza disponible debido a que la piscina de REFINO SUPERIOR se encuentra a una altura geográfica mayor que el del costado de la pila es posible regular y distribuir de forma uniforme y sobre los valores nominales de caudal y presión mínima necesaria.

6.4.2 Sistema Ideal

Basándonos en las condiciones operaciones que se esperan del sistema y considerando el número de paños promedio irrigados de REFINO (40 paños), es decir, 20 ramificaciones y que los paños irrigados sean los más críticos (últimos paños) y que la presión en la última ramificación sea de al menos 21 mcRef. Es sistema ideal en presiones y caudal se muestra en Tabla 23:

Tabla 23. Valores de presión y caudal ideales sistema REFINO

Rn	L(x)	Altura (m)	Q_{ent} Ramificación (m3/hr)	Caudal 2002 m3/hr	Pérdida (mcRef)	Pn (mcRef)
20	2060	13,5	153	193	0,0001	21,00
19	2020	13,2	153	346	0,0009	21,26
18	1980	13,0	153	499	0,0027	21,52
:	:	:	:	:	:	:
3	1380	9,0	153	2794	0,1075	26,05
2	1340	8,8	153	2947	0,1193	26,42
1	1300	8,5	153	3100	0,1316	26,80
0					6,13	35,44

Se puede notar que es necesaria una altura de cabeza de 35,44 mcRef para que el sistema sea hidráulicamente balanceado y sea capaz de cumplir con los valores nominales de caudal y presión. En este sistema tiene luces de estar sobredimensionado, se analizará en capítulos posteriores.

6.5 Refino Superior – Piscina DL

Recordemos que estas bombas solo impulsan solución de refino desde la piscina de refino superior a la piscina DL cuyas características se encuentran en Tabla 5 y Tabla 7 respectivamente. Se analiza de forma individual y no en paralelo como se hizo anteriormente ya que no se unen en ningún punto a lo largo de la línea. Se considera la carga necesaria para impulsar el fluido desde el punto 1 al punto 2 (justo a la salida de la cañería) como se muestra en Figura 6.2:

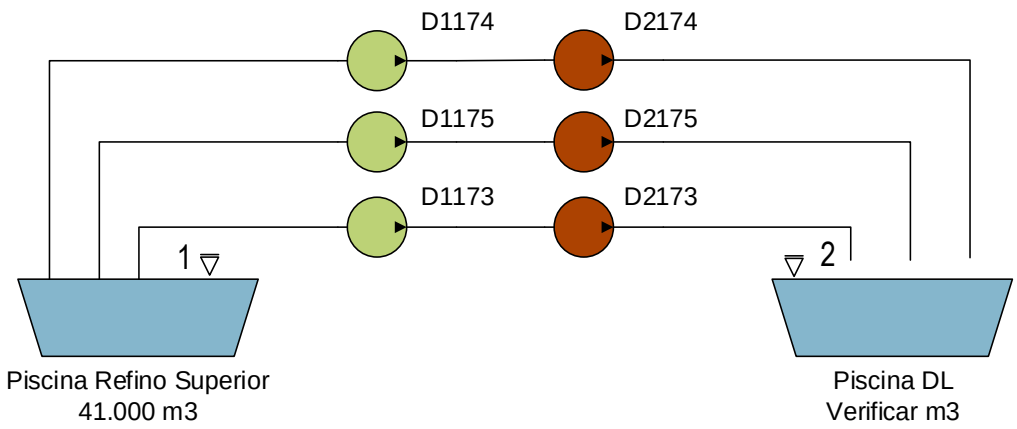


Figura 6.2. Diagrama impulsión refino desde piscina Refino Superior a DL

Se considera presión atmosférica en ambos puntos, y velocidad en punto 1 igual a cero (V_1 = 0 m/s), por lo tanto la ecuación de energía (Ec. 18) se reduce a:

$$H_{necesaria} = \frac{\alpha\, V_2^2}{2\, g} + h_{L,total} + (z2 - z1)$$

Los datos que definen este sistema se muestran en Tabla 24:

Tabla 24. Datos del sistema desde piscina Refino Superior a DL

Parámetro	Valor	Unidad
Material Cañería	HDPE	[-]
L	2500	[m]
D	26 / 0,6604	[pulg] / [m]
Ac	530,93 / 0,343	[pulg2] / [m2]

Vprom	Q / 0,343	[m/s]
Rugosidad ε	7x10-5	feet
zpiscina refino superior	3143	[m]
zpiscina DL	3295	[m]
Viscosidad cinemática	1,1	cSt

La pérdida de carga total es una combinación de pérdidas mayores y menores (Ec. 5) y (Ec. 9) y debido a que el diámetro es constante se tiene:

$$h_{L,total} = \left(f\frac{L}{D} + \sum K_L\right)\frac{V}{2g}$$

El factor de rugosidad adimensional es ε/D = 7x10^{-5} (ft) / 2,17 (ft) = 3,2x10^{-5} [-]. El número de Reynolds (dependiente de Q) de la solución que fluye por la tubería es:

$$\mathrm{Re} = \frac{D\,V}{\upsilon} = \frac{D\,(Q/A)}{\upsilon} = \frac{0{,}6604\,(Q/0{,}343)}{1{,}1x10^{-6}} = 1{,}75X10^{6}\,Q$$

Para valores de Q entre 0,056 [m^3/s] y 0,44 [m^3/s] el número de Reynolds alcanza valores de 97200 a 77800 [-], por lo tanto, se trata de **flujo turbulento**.

A partir de la ecuación de Colebrook (Ec. 7), con ese número de Reynolds y ese factor de rugosidad, se obtiene el siguiente factor de fricción dependiente del caudal como:

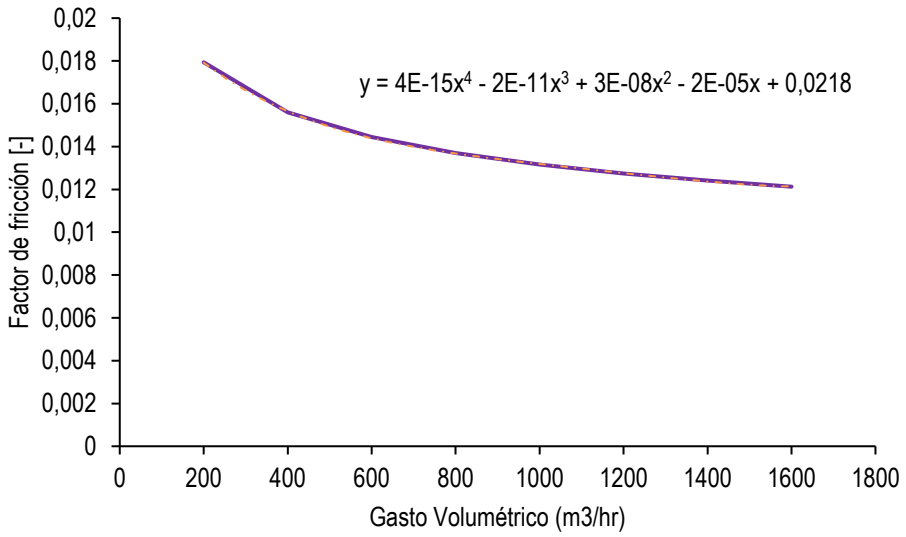


Gráfico 6.5. Factor de fricción dependiente del caudal

El factor de fricción para caudales entre 200 y 1600 [m^3/hr] adquiere valores entre $6{,}58X10^{-4}$ y $8{,}23X10^{-5}$ [-]. Las pérdidas menores se consideran despreciables.

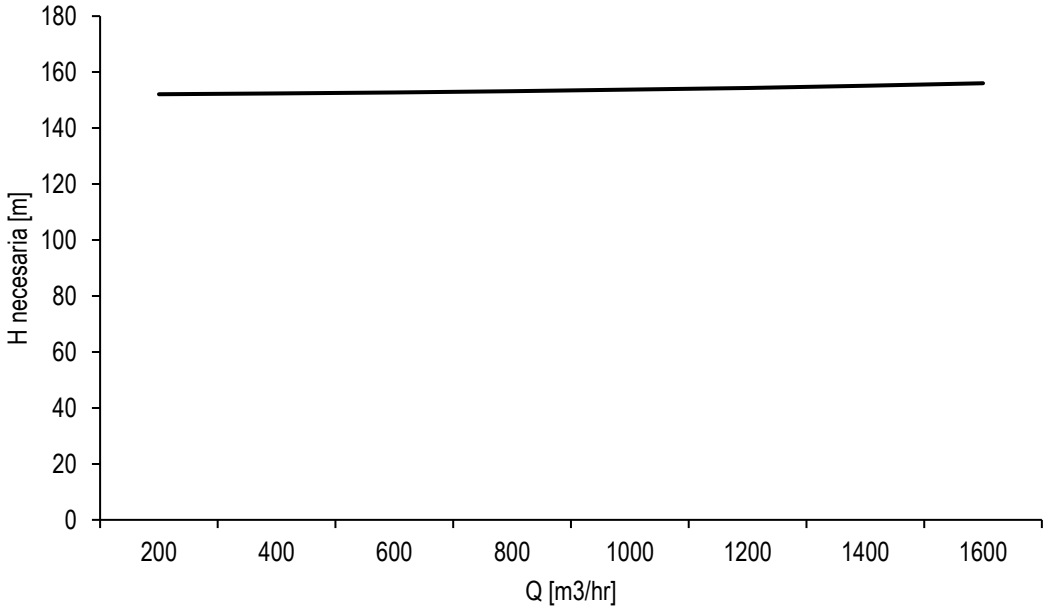
Por lo tanto, la carga requerida es:

$$H_{necesaria} = \left(\alpha + f\frac{L}{D}\right)\frac{V^2}{2g} + (z2 - z1)$$

$$= \left(1 + f(Q)\frac{2500}{0{,}66}\right)\frac{\left(\frac{Q}{0{,}343}\right)^2}{2 \cdot 9{,}81} + (3295 - 3143)$$

$$= (1641 \cdot f(Q) + 0{,}4332) \cdot Q^2 + 152$$

Y queda graficada como:



Para determinar el punto de operación debemos cruzar esta curva con la curva de desempeño de las **bombas en serie** (Anexo B). Existen dos tipos de combinación de estas bombas en serie, estas son:

i. 1 bomba Hazleton 14KL 25.625T + 1 bomba VOGEL (1173 y 1174)
ii. 1 bomba Hazleton 14G 25.625T + 1 bomba VOGEL (1175)

Las curvas de desempeño de estas dos configuraciones en serie se muestran Gráfico 6.6 y Gráfico 6.7:

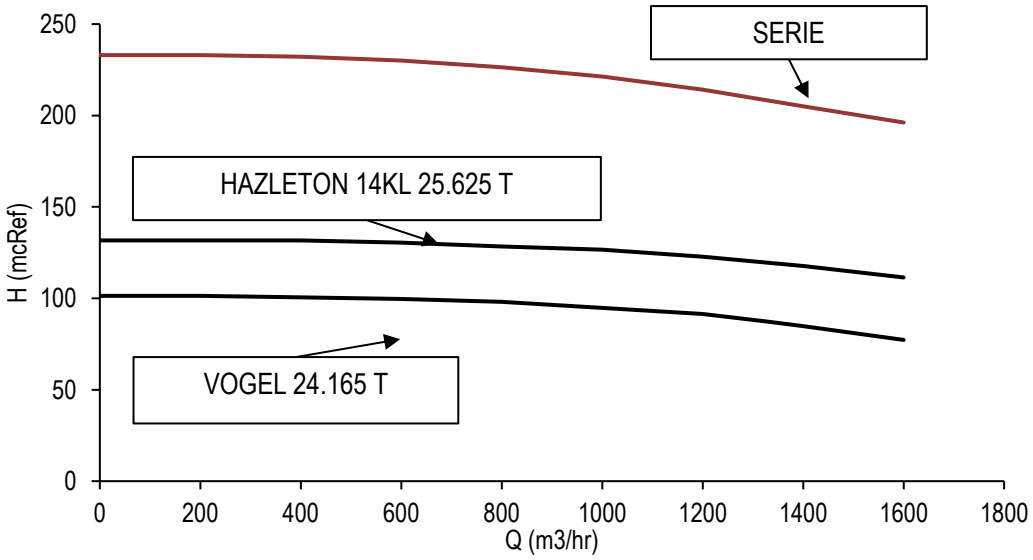


Gráfico 6.6. Curva de desempeño Hazleton 14KL 25.625T + Vogel 24.165T

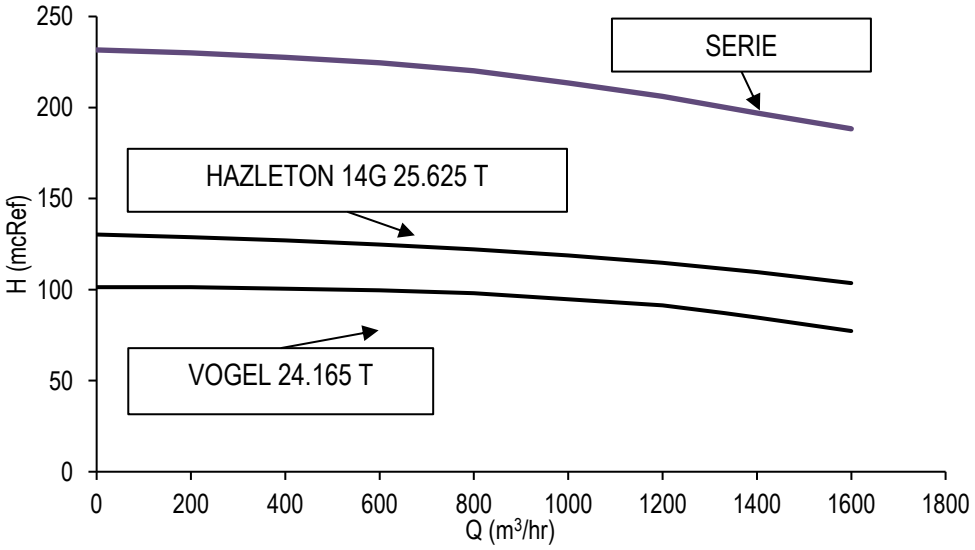


Gráfico 6.7. Curva de desempeño Hazleton 14G 25.625T + Vogel 24.165T

Entonces, juntando la curva de presión demandada con la de presión disponible por cada configuración en serie se obtiene:

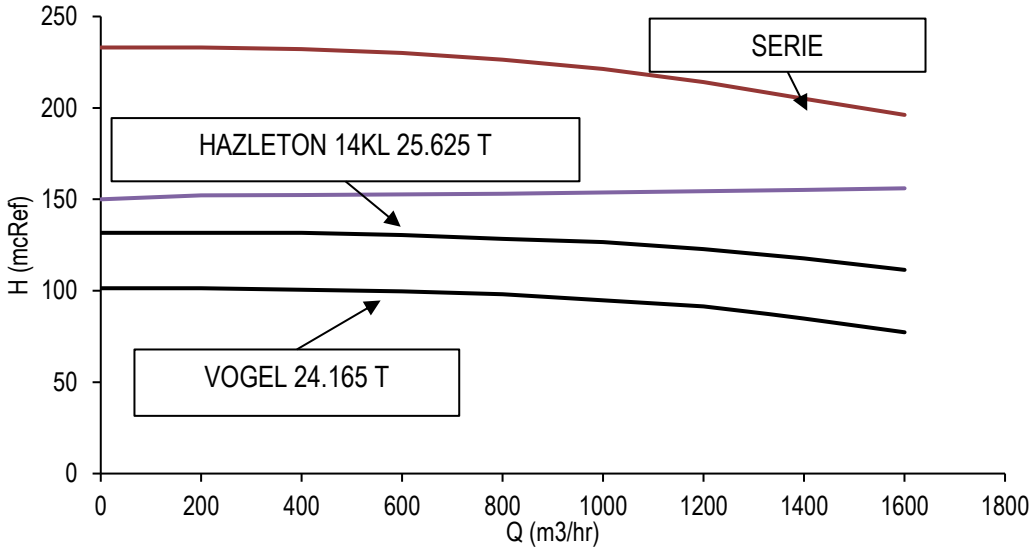


Gráfico 6.8. Curva presiones disponible y demandada D1173 y D1174

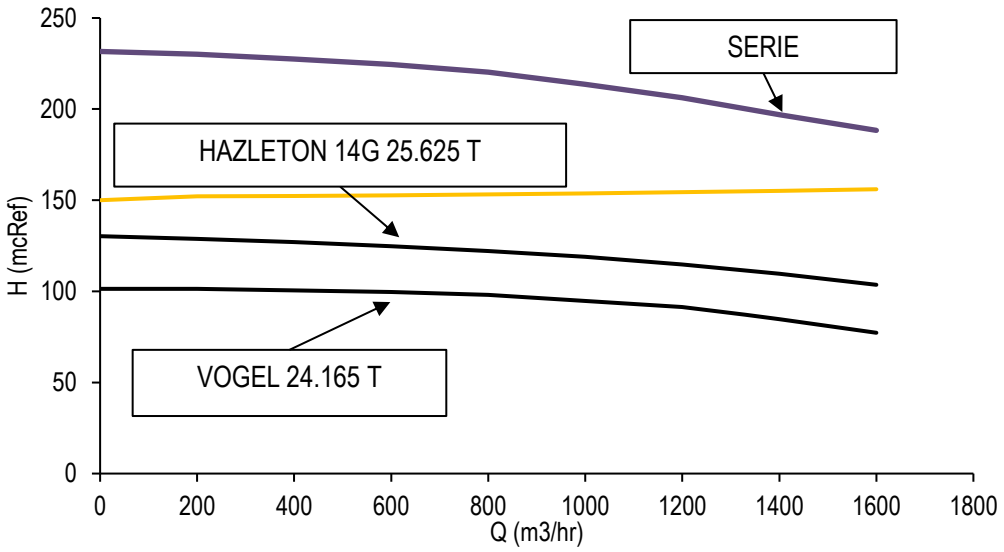


Gráfico 6.9. Curva presión disponible y presión demandada D1175

Se puede apreciar de estos dos gráficos que ninguna de las bombas es capaz de suministrar el caudal nominal a la altura de presión necesaria (152 a 156 mcREf app) y es por esto que se justifica la instalación de una bomba en serie para cada una de estas configuraciones. También se puede notar que la demanda del sistema no intercepta a la curva de presión disponible en el rango mostrado por si sola; es por esto que se regula a través de válvula con el fin de mover el punto de operación de la bomba hacia el rango de máxima eficiencia como lo recomienda el fabricante.

6.6 Piscina Refino Inferior a Piscina Refino Superior

Recordemos que estas bombas impulsan solución de refino desde la piscina de refino inferior a la piscina de refino superior. Las características de estas piscinas se encuentran en Tabla 25:

Tabla 25. Características sistema REFINO inferior – REFINO superior

Característica	Valor	Unidad
L	1500	[m]
D	22 / 0,558	[pulg] / [m]
Ac	380,13 / 0,2451	[pulg2] / [m2]
Vprom	Q / 0,242	[m/s]
Rugosidad ε	7x10-5	feet
Viscosidad	1,1	cSt
z1 (Piscina IPLS)	3030	[m]
z2 (Manifold)	3145	[m]

Aquí solo existe 1 bomba con líneas independientes entre piscinas, 5 de las 6 bombas que impulsan la solución son Hazleton 14KL 24.125T y 1 de ellas (1153) 14KL 24,125T.

Al igual que el caso anterior se considera presión atmosférica en ambos puntos y velocidad en punto 1 igual a cero (0), por lo tanto, la ecuación de energía se expresa como:

$$H_{necesaria} = \frac{\alpha\, V_2^2}{2\, g} + h_{L,total} + (z2 - z1)$$

$$H_{necesaria} = \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_{L,Total} + (z_2 - z_1)$$

El factor de rugosidad ε/D = 7x10^{-5} (ft) / 1.833 (ft) = 3,82 x 10^{-5}. El número de Reynolds de la solución de refino que fluye es:

$$Re = \frac{DV}{\upsilon} = \frac{D\ (Q/A)}{\upsilon} = \frac{(Q/0{,}2451)}{1{,}1x10^{-6}} = 3.709.061\ Q$$

Para valores de q entre 200 m3/hr (0,056 m3/s) y 1600 m3/hr (0,44 m3/s) el número de Reynolds alcanza valores de 210.000 a 1.650.000 [-], entonces se trata en todo su rango de operación de flujo turbulento.

Utilizando la ecuación de Colebrook, el factor de fricción varía según el caudal como se muestra en Gráfico 6.10:

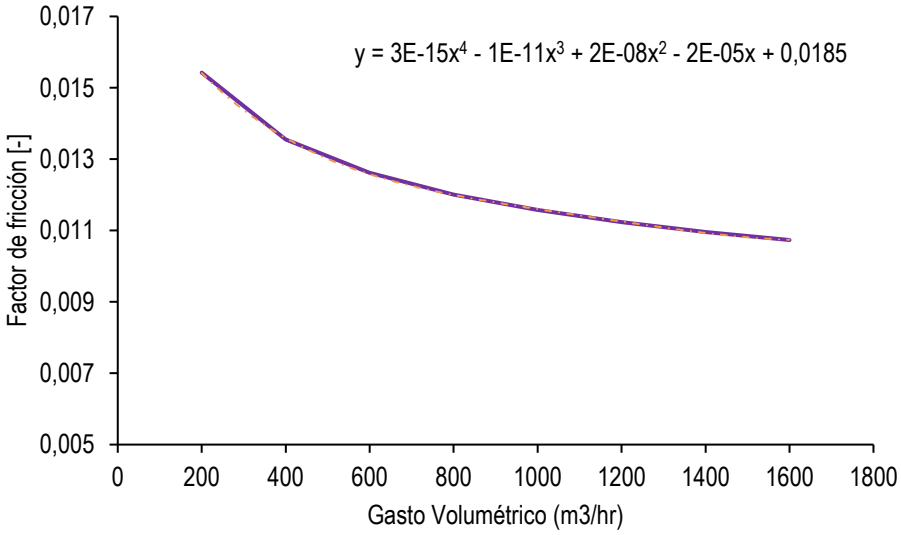


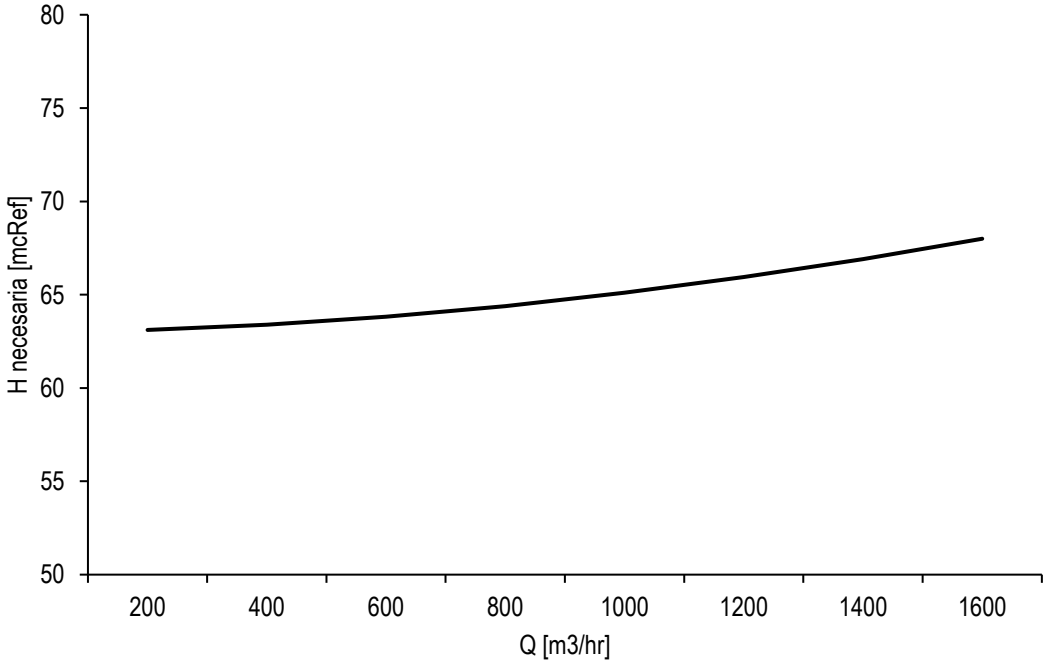
Gráfico 6.10. Factor de fricción dependiente del caudal

Las pérdidas menores se consideran despreciables. Por lo tanto encontramos la carga necesaria como:

$$\mathrm{H}_{\mathrm{necesaria}} = \left(\alpha + f\frac{L}{D}\right)\frac{V^2}{2g} + (z2 - z1)$$

$$= \left(1 + f(Q)\frac{1500}{0{,}5588}\right)\frac{\left(\frac{Q}{0{,}2451}\right)^2}{2 \cdot 9{,}81} + (3143 - 3080)$$

$$= (2278 \cdot f(Q) + 0{,}85) \cdot Q^2 + 63$$



Para determinar el punto de operación se une esta curva con la curva de desempeño de las bombas Hazleton 14KL 24.125T y 14G 24.125T como se muestra en

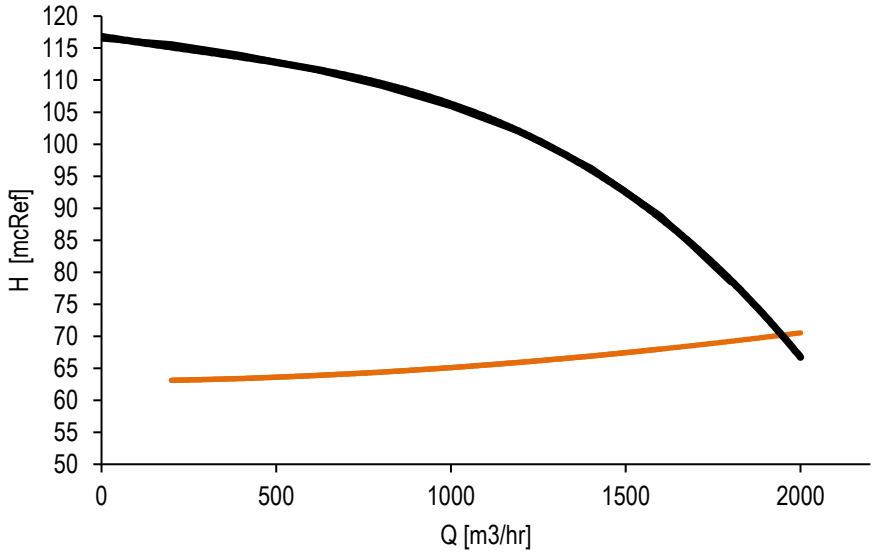


Gráfico 6.11. Curva H necesaria y H disponible Hazleton 14KL 24.125T

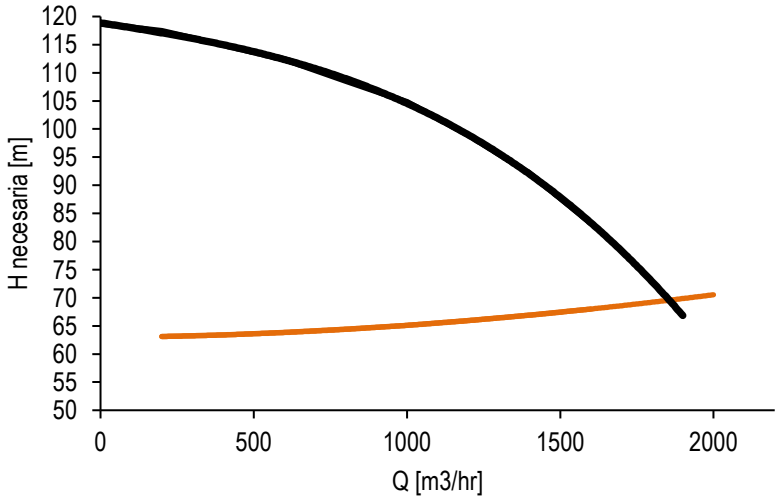


Gráfico 6.12 Curva H necesaria y H disponible Hazleton 14G 24.125T

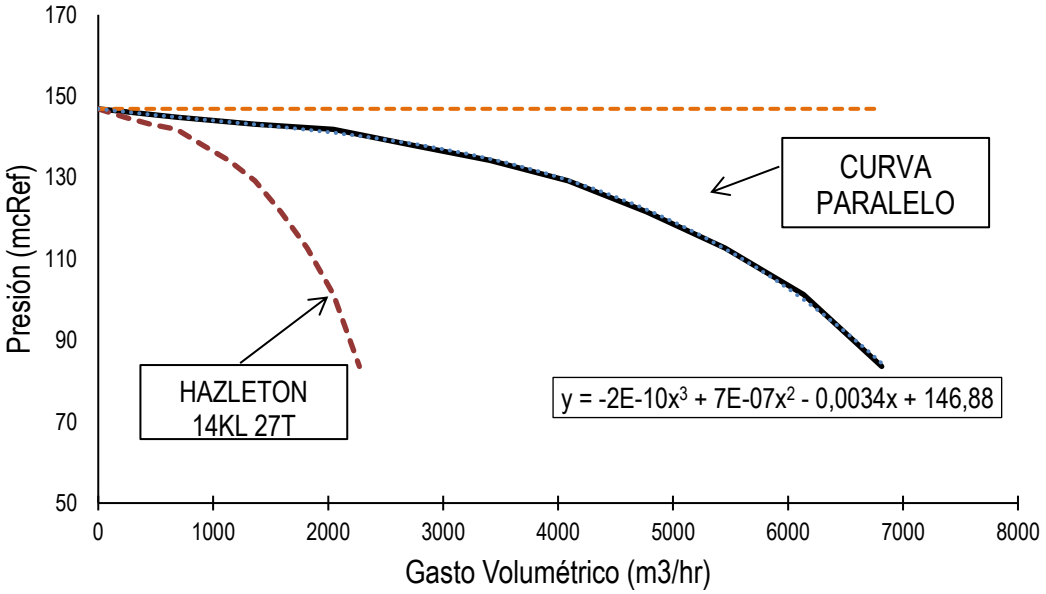
Se puede apreciar que el sistema demanda una presión menor a la que entregan la bomba en su máxima eficiencia, por lo que se regula a través de válvulas con la finalidad de llevar el punto de operación a su valor nominal.

7 POSIBILIDADES DE MEJORA DESEMPEÑO

7.1 IPLS – Pila Dinámica

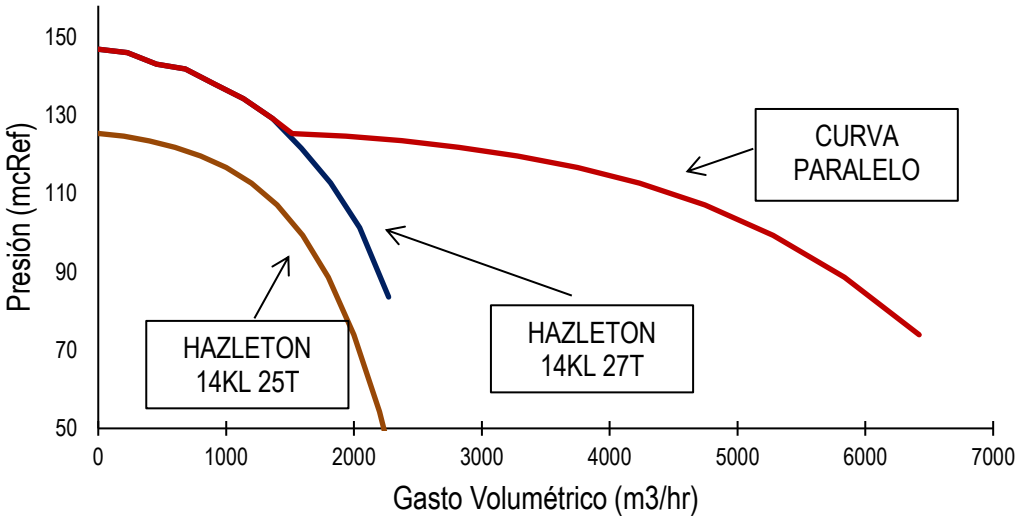
El sistema en general está limitado por la presión disponible para cada ramificación y por el caudal que aquella ramificación en particular demanda del sistema según la presión correspondiente. En este sentido es posible apreciar del capítulo 4.2.5 que la presión de entrada alcanza un valor óptimo pero debido a las pérdidas no es capaz de suministrar el caudal necesario para cada ramificación y dentro de ella para cada peine. Si se analiza el sistema ideal visto en 6.3.2 existe una presión a un caudal determinado que debería intentar cumplirse con las bombas actuales y el contexto operacional en el que se encuentran. Lo más lógico es buscar una configuración en paralelo que cumpla con los requisitos mencionados (110 mcRef a 4120 m^3/hr), analicemos:

Para una configuración de 3 bombas 14KL con el mayor diámetro admisible de 27" se obtiene una curva de desempeño como:



De aquí se puede notar que para una presión de 110 mcRef se obtiene un gasto volumétrico de unos 5500 m3/hr. Entonces se cumplirían satisfactoriamente los parámetros buscando realizando una regulación a través de válvulas que lleven el punto de operación a 4120 m^3/hr pero implica por otro lado la intervención de 3 bombas.

Por esta razón vamos a buscar una configuración que signifique la modificación de impulsor de la menor cantidad de bombas. Supongamos la modificación de solo la bomba con impulsor de 24.125T a 27T dejando un conjunto de bombas en paralelo de 2 bombas Hazleton 14Kl 25T + 1 Hazleton 14Kl 27T, se obtiene:



Donde para una presión de 110 mcRef se obtiene un gasto volumétrico de 1890 m3/hr (27T) + 1255 (25T x2) da un gasto volumétrico de 4400 m3/hr. Con esta configuración es suficiente y significa modificar solo una de las tres bombas.

7.2 Sistema de irrigación sobre la pila

Si bien es cierto, el sistema es capaz de cumplir por sí solo un gran porcentaje de la demanda de presión y caudal tanto cuando se trata de IPLS o REFINO la situación sobre la pila en promedio muestra tasas de riegos ideales pero la situación real sobre la

pila por peine en particular demuestra que las tasas de riego no se encuentran bien balanceadas; se observa la situación para una ramificación de IPLS como se muestra en Tabla 26:

Tabla 26. Tasas de riego por peine irrigación IPLS

N° Peine	Tasa de Riego (lph/m^2)	Hn máx entrada Peine (mcRef)
8	3,37	8,07
7	6,93	8,46
6	7,17	9,05
5	7,75	10,58
4	8,76	13,54
3	9,65	16,49
2	10,05	17,88
1	10,38	19,09
0		29,61
Promedio	8,43	

Como se puede ver los paños más cercanos al comienzo de la ramificación están sobre-rregados y los más lejanos con un déficit sin considerar el paño 8 que debe trabajar a la mitad. Este escenario es poco favorable para los porcentajes de recuperación por cada sección de paño o peine ya que si recordamos la configuración de la pila los últimos peines se utilizan para regar mayor cantidad de material apilado que el material apilado en los paños más cercanos, llevando la curva cinética por la razón de lixiviación menor a un porcentaje de recuperación también menor.

Esta diferencia de presiones y caudal es regulable a través de restricciones de caudal que sí existen en cada línea sub-principal de 2 pulgadas pero que por motivos operacionales (falta de personal que regule cada una de las válvulas) y al ser manuales se manejan 100% abiertas o 100% cerradas siempre.

La solución más viable para este caso es la instalación de válvulas reguladoras de presión a la entrada de cada línea sub-principal de dos pulgadas que estén configuradas para regular la presión a una presión que permita obtener una tasa de riego de 8 lph/m^2. A través del programa es posible determinar que esta presión es igual a 11,5 mcRef equivalente a 13,85 mca o 19,7 psi.

Se recomienda el análisis de la variación porcentual debido a la modificación de la razón de lixiviación producto de la regulación de presiones sobre la pila.

7.3 Costos

El costo del cambio de impulsor se cotizó con WEIR empresa que compró la línea de bombas Hazleton que son los proveedores directos de esta marca, para la compra de 2 impulsores de 27” de diámetro el costo se muestra en Figura 7.1:

Vulco S.A.
Av. San José 0815
San Bernardo
Chile

TEL: 562 2754 2200
FAX: 562 2754 2000

M:

WEIR Minerals

Cotización	Fecha 29.10.2018	Nº de oferta **3000066493**

Dirección	Dirección de entrega
COMPANIA MINERA ZALDIVAR SPA AVENIDA GRECIA 750 ANTOFAGASTA-ANTOFAGASTA CHILE	COMPANIA MINERA ZALDIVAR SPA AVENIDA GRECIA 750 ANTOFAGASTA-ANTOFAGASTA CHILE

Nº Ref. Cliente	Fecha		Referencia cliente
165656 NI 32812 MAH	29.10.2018		10009971
Fecha de entrega	Persona de contacto	Validez	
11.08.2019	Omar aracena	29.10.2018 - 29.11.2018	

Pesos y volúmenes	
Peso neto	0,000 KG

Requisitos	
Incoterm : EXW Ex - Works Moneda : CLP	Condiciones de pago : Neto 30 días Inv

Item	Material Información detallada	Cantidad	Descripción Plazo de Entrega	Precio unitario	Total linea
000010	601578-078	2,000 C/U	IMP 27.00T 5V20077 Plazo de entrega 40 Sem(s)	74.347.264	148.694.528

Total items		148.694.528
IVA	19%	28.251.960
Importe total	**CLP**	176.946.488

Figura 7.1. Cotización de dos Impulsores de 27”

El costo de la implementación de 8 válvulas reguladoras por ramificación, en 52 ramificaciones se realizó con la empresa Provetek S.A para 12 ramificaciones, se muestra en Figura 7.2.

PROVETEK
INGENIERÍA VENTAS

12 / 06 / 2018 2:48 pm
RptRefCotizacion.rpt
Página: 1

DATOS DEL PEDIDO

Fecha de la Cotizaci		**Almacén**	GENERAL
Agente		**Tipo de venta**	3063-MAYOREO CREDITO
		IVA. Aplicado 0%	

DATOS DEL SOLICITANTE

Nombre		**RFC**	
Dirección		**Colonia**	
Entre calles		**Deleg. ó Mpo.**	BENITO JUAREZ
Estado	QUINTANA ROO		
Teléfono casa		**Teléfono oficina**	
E-mail			

DETALLE

Código	Descripción	Ubicación	Cant.	Precio Unit.	Descuento	Subtotal	IVA	Total
CV6Z - 7G391-A	INTERRUPT	B007E	1	7,001.97	0.00	7,001.97	1,120.32	8,122.29
CV6Z - 7A100-B	CUERPO DE VALVULAS ARMADO	B007D	1	15,211.90	0.00	15,211.90	2,433.90	17,645.80
	Flete: 0		**Totales:**		**$0.00**	**$22,213.87**	**3554.22**	**$25,768.09**

Figura 7.2. cotización válvulas reguladoras Provetek

8 MANTENIMIENTO

En este capítulo se presentarán indicadores de mantenimiento según los eventos de falla, los planes de mantenimiento que consideran a las bombas de las piscinas de IPLS y Refino Superior, y a través de un análisis de inputs proponer una estrategia de mantenimiento:

8.1 Problema

Existe de parte del área de operaciones cierto resquemor a la hora de realizar mantenimiento por el potencial impacto que tendría que una de las bombas de las piscinas estudiadas sea sacada de servicio. Se busca entonces mostrar y evaluar el impacto que tiene poner fuera de servicio estos activos y el impacto que pueda tener su intervención desde el punto de vista del mantenimiento, mejorando su mantenibilidad al poder contar con una mayor capacidad de programación de tareas, disponibilidad de mano de obra y repuestos antes de que ocurra la falla funcional, además de entregar recomendaciones en cuanto a la estrategia de mantenimiento teniendo en cuenta que las modificaciones que se proponen sean puestas en práctica.

8.2 Análisis de Criticidad

El análisis de criticidad de activos permite identificar y jerarquizar los activos según su nivel de impacto en el negocio de la compañía y orientar la asignación de recursos. Para el análisis en este caso se ocupa el método cuantitativo presentado en capítulo 4.8.1.

$$R = FXC$$

$$C = S + MA + P + C\mathrm{R}$$

S: Seguridad, MA: Medio Ambiente, P: Producción, CR: Costo de Reparación

Para el caso de la frecuencia de falla (F), el equipo de confiabilidad de la compañía ha definido establecer la clasificación y escala para jerarquizar los activos como se muestra en Tabla 27:

Tabla 27. Clasificación de frecuencia de falla e indicador de frecuencia

Frecuencia de Falla	Valor
Ocurren fallas diariamente	6
Ocurren fallas una vez por semana	5
Ocurren fallas una vez al mes	4
Ocurren fallas cada 6 meses	3
Ocurren fallas una vez al año	2
Ocurren fallas cada 10 años	1

Los factores que afectan a el valor C (consecuencia) se definen en tablas desde Tabla 28 a Tabla 31:

Tabla 28. Clasificación de Impacto en Seguridad y valor

Seguridad	Valor
Riesgo de accidente con fatalidades múltiples	40
Riesgo de accidente con una fatalidad	38

Riesgo de accidente con discapacidad permanente	30
Riesgo de accidente con tiempo perdido	12
Sin riesgo para las personas	0

Tabla 29. Clasificación de Impacto en MA y valor

Seguridad	Valor
Riesgo de daño medio ambiental severo y de largo plazo	40
Riesgo de daño medio ambiental de largo plazo	32
Riesgo de daño medio ambiental de corto plazo	28
Riesgo de daño medioambiental menor	10
Sin daño al medio ambiente	0

Tabla 30. Clasificación de Impacto en producción y valor

Seguridad	Valor

Pérdida de producción equivalente mayor a 1 día (67.200 ton)	12
Pérdida de producción equivalente entre 12 horas y 1 día (>= 33.600 y <=67.200 ton)	8
Perdida de producción equivalente entre 2 y 12 horas (>=5.600 y <= 33.600 ton)	4
Pérdida de producción equivalente hasta 2 hrs (<= 5.600 ton)	2
Sin pérdida de producción	0

Tabla 31. Clasificación de Impacto en Costos de Reparación y valor

Seguridad	Valor
Costo de reparación >500.000 USD	10
Costo de reparación >100.000 Y <=500.000 USD	8
Costo de reparación >50.000 Y <=100.000 USD	5
Costo de reparación >10.000 Y <=50.000 USD	2
Costo de reparación <=10.000 USD	1

Sumados estos factores y obtenido el valor de consecuencia para cada activo este valor es rebajado a valores de 1 a 6 a través de una matriz de índice de consecuencia como se muestra en:

Tabla 32. Clasificación de Impacto en Costos de Reparación y valor

Puntaje en Evaluación de consecuencia	Índice equivalente de consecuencia
Consecuencia total >= 38	6
Consecuencia total >= 28 y < 38 o consecuencia en producción =12	5
Consecuencia total >= 20 y < 28	4
Consecuencia total >= 10 y < 20	3
Consecuencia total > 4 y < 10	2
Consecuencia total <= 4	1

Las bombas de las piscinas de lixiviación IPLS, Refino Inferior y superior fueron evaluadas, los resultados son:

	Equipo	Frecuencia Falla	S	MA	P	CR	C	Índice Consecuencia	F	Criticidad
					IPLS ÓXIDO A LIXIVIACIÓN ÓXIDOS					
1	BOMBA 1 D2001 IPLS OXIDO	6 meses	12	10	4	2	28	5	3	15
2	BOMBA 2 D2002 IPLS OXIDO	6 meses	12	10	4	2	28	5	3	15
3	BOMBA 3 D2003 IPLS OXIDO	6 meses	12	10	4	2	28	5	3	15
4	BOMBA 4 D2004 IPLS OXIDO	6 meses	12	10	2	2	26	4	3	12
					REFINO SUPERIOR A LIXIVIACIÓN ÓXIDOS					
5	BOMBA 1 REFINO SUP 1170	6 meses	12	28	4	1	45	6	3	18
6	BOMBA 2 REFINO SUP 1171	6 meses	12	28	4	1	45	6	3	18
7	BOMBA 3 REFINO SUP 1172	6 meses	12	28	4	1	45	6	3	18

				REFINO SUPERIOR A PISCINA DUMP LEACH						
8	BOMBA 4 REFINO SUP 1173	6 meses	12	28	4	1	45	6	3	18
9	BOMBA 5 REFINO SUP 1174	6 meses	12	28	4	1	45	6	3	18
10	BOMBA 6 REFINO SUP 1175	6 meses	12	28	4	1	45	6	3	18
				REFINO INFERIOR A REFINO SUPERIOR						
11	BOMBA 1 D1150 REFINO INF	6 meses	12	28	4	1	45	6	3	18
12	BOMBA 2 D1151 REFINO INF	6 meses	12	28	4	1	45	6	3	18
13	BOMBA 3 D1152 REFINO INF	6 meses	12	28	4	1	45	6	3	18
14	BOMBA 4 D1153 REFINO INF	6 meses	12	28	4	1	45	6	3	18
15	BOMBA 5 D1154 REFINO INF	6 meses	12	28	4	1	45	6	3	18
16	BOMBA 6 D1155 REFINO INF	6 meses	12	28	4	1	45	6	3	18
17	BOMBA 7 D1156 REFINO INF	6 meses	12	28	4	1	45	6	3	18

18	BOMBA 8 D1157 REFINO INF	6 meses	12	28	4	1	45	6	3	18
19	BOMBA 9 D1158 REFINO INF	6 meses	0	0	0	0	0	1	3	3
20	BOMBA 10 D1159 REFINO INF	6 meses	0	0	0	0	0	1	3	3

8.3 Impacto de mantenimiento programado

Consideramos sacar de servicio una bomba por vez con el sistema ya modificado en su impulsor, el impacto para el riego IPLS se obtiene como:

a) Mantenimiento programado Hazleton 14KL 25T

Al sacar de servicio una bomba Hazleton 14KL 25T se obtiene un sistema en paralelo cuya curva de desempeño se muestra en Gráfico 8.1:

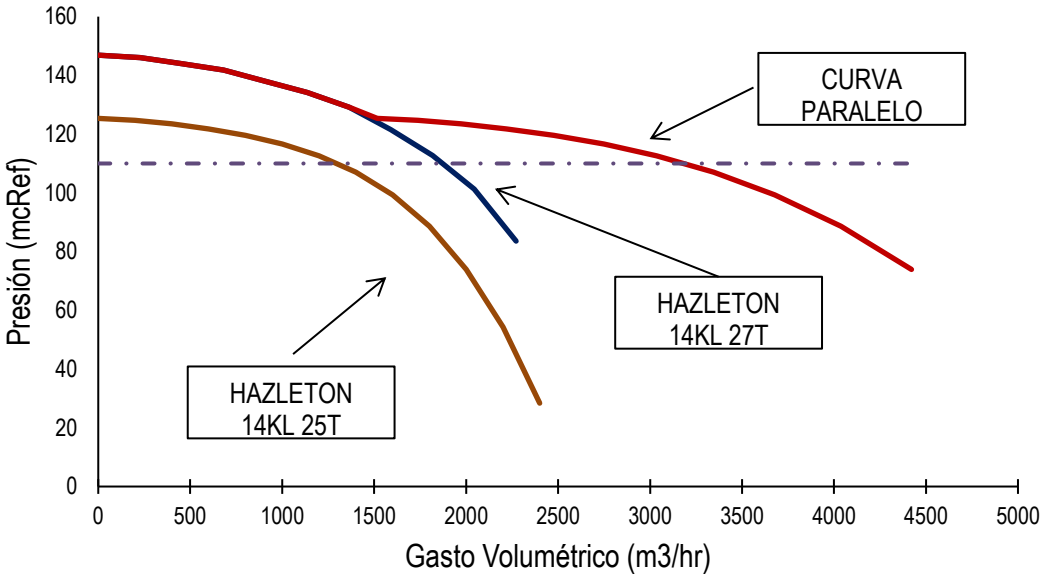


Gráfico 8.1. Curva de desempeño Hazleton 14KL 25T + Hazleton 14Kl 27T

De esta curva se puede obtener que para 110 mcRef se obtiene un gasto volumétrico de 3140 m^3/hr. Con este caudal es posible abarcar el caudal requerido de 15 de los 20 paños calculados en el sistema ideal del capítulo 6.3.2, que significa una reducción del 25% con respecto del sistema ideal. Si comparamos con el sistema anterior en donde existe un impulsor de 24.125 en vez de uno de 27” al sacar de servicio una bomba 25T

significa poder abarcar 10 de las ramificaciones del sistema ideal, es decir una caída del rendimiento de 50%.

b) Mantenimiento programado 14KL27T

Al sacar de servicio la bomba Hazleton 14KL 27T se obtiene un sistema en paralelo cuya curva de desempeño se muestra en Gráfico 8.2:

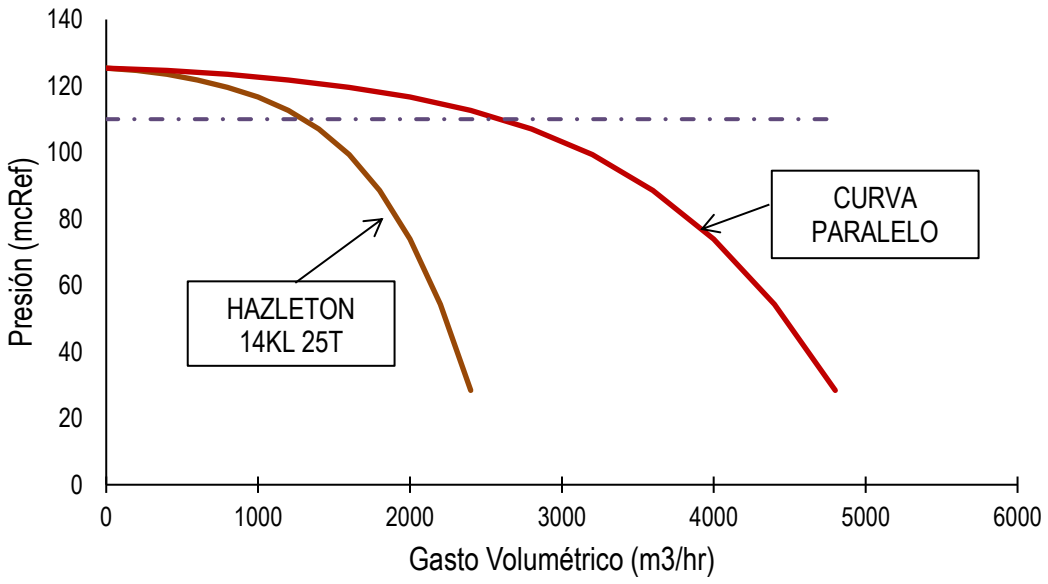


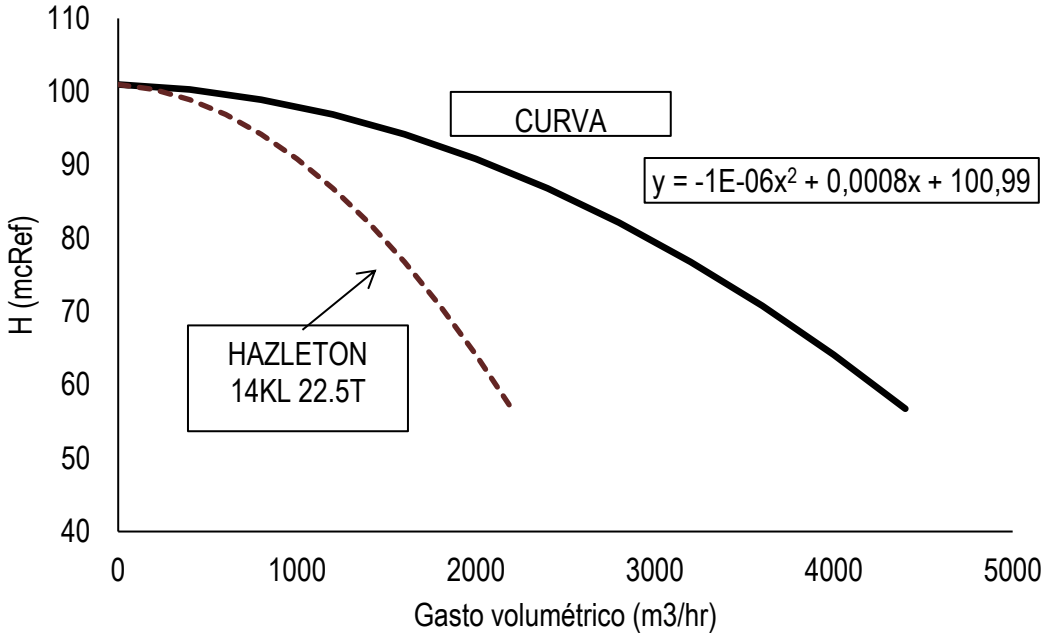
Gráfico 8.2. Curva de desempeño sistema paralelo Hazleton 14KL 25T (x2)

De esta curva se puede obtener que para 110 mcRef se obtiene un gasto volumétrico de 2510 m^3/hr. Con este caudal es posible abarcar el caudal requerido de 12 de los 20 paños calculados en el sistema ideal del capítulo 6.3.2, que significa una reducción del 40% con respecto del sistema ideal. Esta situación con el impulsor de 24.125T en vez de 27T es la misma.

Para el sistema de REFINO:

a) Mantenimiento programado 14G 22.5T

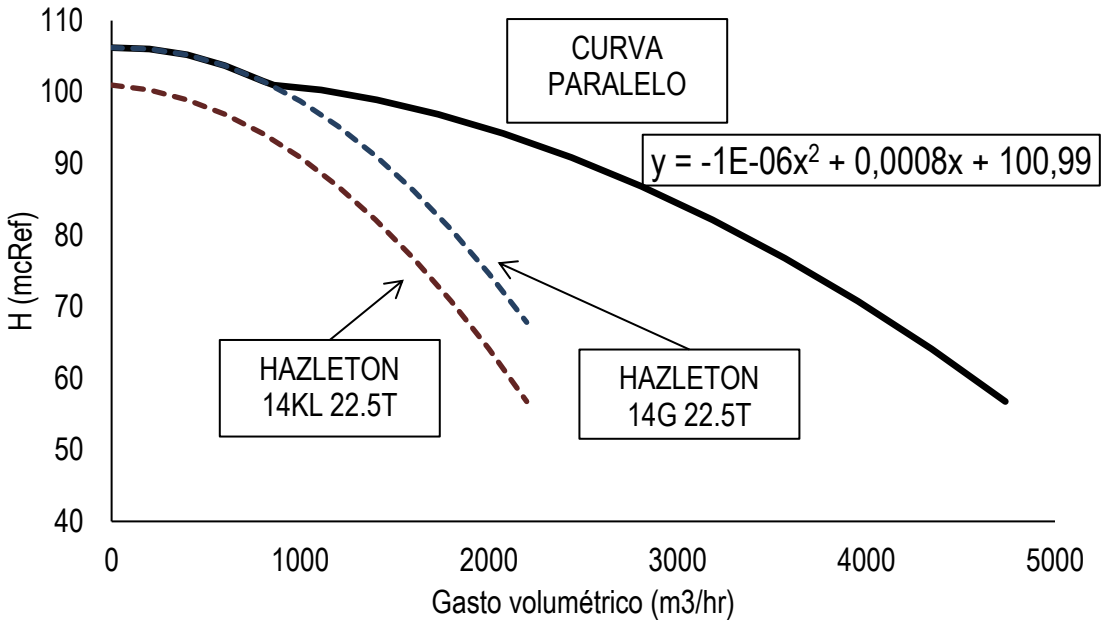
Si se saca de servicio la bomba Hazleton 14G 22.5T el sistema se convierte en un sistema en paralelo de dos bombas Hazleton 14KL 22.5T cuya curva de desempeño se obtiene como:



Para esta configuración y una presión demandada por 35,44 m3/hr es necesario restringir para llevar la curva a máxima eficiencia y caudal nominal de 1130 (m^3/hr). Considerando las dos bombas se obtiene como mínimo se obtiene un caudal nominal de 2260 (m^3/hr). Esto significa poder abarcar la demanda del sistema de 14 de 21 paños, es decir un baja del desempeño de 33%.

b) Mantenimiento programado 14KL 22.5T

Si se saca de servicio la bomba Hazleton 14KL 22.5T el sistema se convierte en un sistema en paralelo de dos bombas: 1 Hazleton 14KL 22.5T y 1 Hazleton 14G 22.5T cuya curva de desempeño se obtiene como:



Para esta configuración y una presión demandada por 35,44 m3/hr es necesario restringir para llevar la curva a máxima eficiencia y caudal nominal de 1130 (m^3/hr) para 14KL 22.5T y un caudal de 1410 (m^3/hr). Considerando las dos bombas se obtiene como mínimo se obtiene un caudal nominal de 2540 (m^3/hr). Esto significa poder abarcar la demanda del sistema de 16 de 21 paños, es decir un baja del desempeño de 24%.

8.4 Estrategia de mantenimiento actual

Dentro de la estrategia definida para el mantenimiento de estas bombas, se encuentran cargados al sistema SAP los siguientes planes:

Tabla 33. Planes existentes en SAP para

Equipo	Plan Mantenimiento	Frec	Resumen Operación
Bbas IPLS	PM EF BOMBAS IPLS OXIDO	1S	Revisión Temperatura Rodamientos y fisuras en cañerías de succión
Bbas RAL	PM EF LUBRICAR BOMBAS RAL	4S	
Bbas IPLS	PM EF 8S INSP BOMBAS IPLS OXIDO	8S	
Bbas IPLS	PM EF 12S INSP BOMBAS IPLS OXIDO	12S	Revisión base de motor y bomba, válvula abrir o cerrar y lubricación caja reductora del hilo de tornillo
40133	PM EF 4S BOMBAS REFINO AREA 34	4S	-
Bbas. Refino Inferior	PM EF 8S BOMBAS REFINO AREA 34	8S	Toma muestra de aceite del motor
Bbas Refino Inferior	PM EF 12S BOMBAS REFINO AREA 34	12S	Revisión base de motor y bomba, válvula abrir o cerrar y lubricación caja reductora del hilo de tornillo
Bbas Refino Inferior	PM EF 24S BOMBAS REFINO AREA 34	24S	Revisión base de motor (deformación y deterioro por contaminación) y re-torquear pernos de la base del motor

8.5 Historial de fallas

Se consideran los datos de fallas obtenidos desde Confiabilidad Área Húmeda que comprende los eventos de falla desde Octubre 2017 hasta Septiembre 2018 [12]. Los eventos de falla se presentan según sistema y subsistema en:

Tabla 34. Eventos de Falla

Sistema	Equipo	Descripción	Fecha Inicio	Hora Inicio	Duración Falla [hr]
Bombas IPLS	D2001	F/S por cambio de impulsor	31-01-2018	7:00	12,00
		F/S por cambio de impulsor	31-01-2018	19:00	3,25
	D2004	Abertura soldadura línea 22"	12-10-2017	Sin Inf	8,25
		Rotura soldadura matriz 22"	13-10-2017	Sin Inf	22

Tabla 35. Eventos de Falla

Sistema	Equipo	Descripción	Fecha Inicio	Hora Inicio	Duración Falla [hr]
Bombas Refino Superior a Pila HL	D1170	Rotura en línea de alimentación de la bomba, en la altura del paño 34	03-11-2017	Sin inf	12,00
		Filtración en línea (Stub-end)	09-04-2018	3:15	75,75
		Rotura soldadura matriz 22 in	12-04-2018	7:00	22,00

8.6 Plan de cambio por condición

Como se mostró en 8.4 no existe un plan que revise ni registre el desempeño de los equipos y de igual forma no se ha definido las fallas funcionales de estos equipos, por lo que podemos decir lo siguiente:

Supongamos se realizan las modificaciones recomendadas, existe un gasto volumétrico mínimo que son capaces de entregar las bombas a una presión determinada mcRef. Producto del desgaste de los álabes ya sea por vita útil, problemas de cavitación, etc. se produce una caída en este gasto volumétrico, es por esto por lo que es posible determinar un límite de desempeño que gatille un mantenimiento por condición del impulsor de la bomba. Estos valores son:

Tabla 36. Valores límites para desempeño bombas

Sistema	Equipo	Valor Límite (m^3/hr)
IPLS	Hazleton 14KL 25T	1250
	Hazleton 14KL 27T	1850
REFINO	Hazleton 14KL 22.5T	1130
	Hazleton 14G 22.5T	1410

9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Luego de obtener los datos, los escenarios hipotéticos y el modelar el impacto que tiene poner fuera de servicio lo equipos se puede concluir que:

a) El sistema de irrigación de solución IPLS no es capaz de entregar el caudal solicitado a una presión determinada al número promedio de paños promedio. Las pérdidas de presión por fricción y la diferencia de altura entre la piscina de IPLS y la pila es considerable y provoca que la presión caiga por debajo del límite admisible del sistema balanceado. Una solución que mejora el desempeño de este sistema se presenta en capítulo 7.1.

b) El sistema de irrigación de solución de REFINO es capaz de entregar el caudal solicitado a la presión que demanda el sistema muy por encima de la necesaria por lo que no necesita ser intervenido mayormente.

c) Los sistemas de impulsión de solución inter-piscinas es básico y demanda presión en mcRef básicamente por las diferencias de altura de las piscinas. El sistema en serie que impulsa solución entre la piscina de refino superior y DL se justifica.

d) Si se desean obtener mejores resultados en los porcentajes de recuperación y razones de lixiviación es necesario regular las presiones de entrada en cada peine con la presión que se sugiere en este trabajo presentada en capítulos anteriores, para ello lo más recomendable es implementar la regulación de presión a través de válvulas reguladoras que sean configuradas según sea la solución irrigada.

e) Se recomienda implementar un plan de mantenimiento de cambio de impulsor por condición a través del desempeño de cada equipo según los parámetros que se

presentan en este trabajo, que impacten en la preparación del mantenimiento y otros factores externos que impacten en una mejora de la mantenibilidad.

f) En este trabajo existe un análisis detallado de las características que tienen los sistemas en cuanto a desempeño con los cuales se pueden respaldar a través de números el impacto que tiene la salida de servicio de los equipos, factor fundamental que coartaba muchas veces las labores de mantenimiento por parte del área de operaciones de la compañía.

10 REFERENCIAS

[1] Zaldívar una minera con historia. 7 de Diciembre de 2015. Revista Técnicos Mineros. Disponible en http://www.revistatecnicosmineros.com/2015/12/zaldivar-una-minera-con-historia/

[2] Steffen, Roberstson and Kirsten, Inc. Mayo de 1993. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Zaldívar. Disponible en http://seia.sea.gob.cl

[3] Proceso de Producción. (s.f). Barrick Latam. Disponible en https://barricklatam.com/proceso-de-produccion/barrick/2012-08-28/190954.html

[4] Ministerio de Minería. 12 de Marzo de 2018. Historia de la minería en Chile. Disponible en http://www.minmineria.gob.cl/%C2%BFque-es-la-mineria/historia-de-la-mineria-en-chile/

[5] Yunus A. Çengel, Jhon M. Cimbala, (2012), *Mecánica de Fluidos. Fundamentos y Aplicaciones (Versión en Español),* México D.F, México: McGraw-Hill/Interamericana.

[6] WEG Australia PTY LTD, (2016), HGF: Low and High Voltage High Performance Electric Motor Range. Sydney, Australia.

[7] Chevron Phillips Chemical Company LP, (Abril, 2018). *The Performance Pipe – Field Handbook.*

[8] Claudio Mataix (1986), *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas – Segunda Edición,* Madrid, España: Ediciones del Castillo S.A.

[9] Patricio Navarro, Daniel Espinoza y Cristian Vargas (2017). *Caracterización de diluyentes usados en extracción por solventes*. Santiago, Chile. Disponible en https://knepublishing.com/index.php/KnE-Engineering/article/view/1439/3482

[10] Zella L., Kettab A. (2002). Numerical methods of microirrigation lateral design. *Biotechnol. Agron. Soc*

[11] Zella L., Kettab A., Chasseriaux G. (2006). Design of a micro-irrigation system based on the control volume method. *Biotechnol. Agron. Soc*

[12] Jaime Figueroa Nieto (2013), *Introducción al Análisis Numérico para Ingeniería*, Valparaíso, Chile: Editorial USM.

[13] Gerencia de Operaciones Área Húmeda (2017). Registro operacional mensual, bombas y tasas de riego M3TON.

[14] Gerencia de Mantenimiento, Superintendencia de Confiabilidad y Mejoramiento. (Septiembre 2018) Base de datos Área Húmeda 2018.

[15] Adolfo Crespo Márquez, PhD, (2007*), The Maintenance Management Framework "Models and Methods for Complex Systems Maintenance"*. Sevilla, España: Editorial Springer

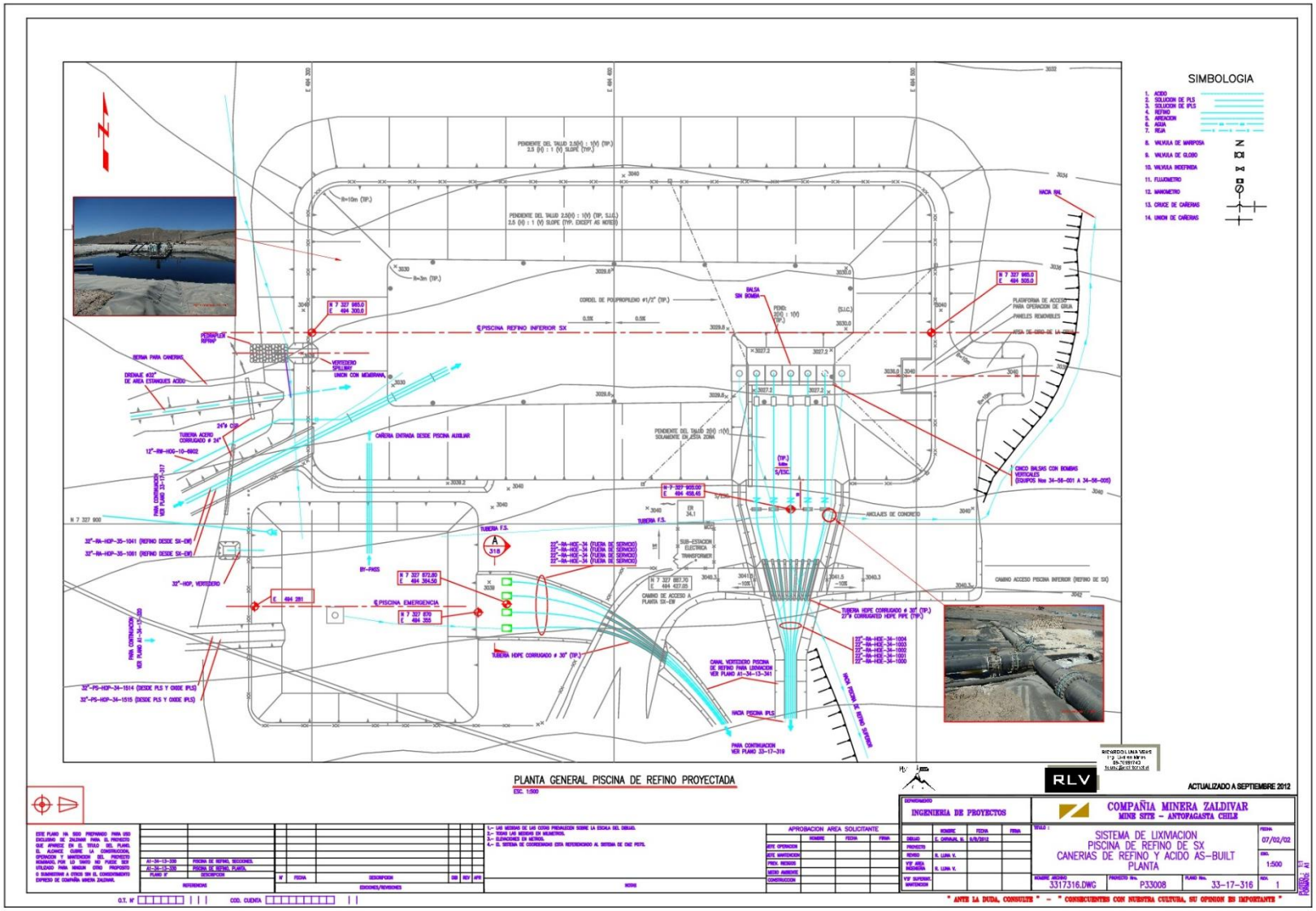
[16] Magín Eduardo Torres Rubilar, (2008). *"Análisis de Sistemas Particulados: Balance de Materiales"*. Recuperado de https://www.u-cursos.cl /ingenieria/2008/1/ MI42C/1/material_docente/bajar?id_material=166165

[17] Alejandro J. Pistarelli (2012). "Manual de Mantenimiento: Ingeniería, Gestión y Organización".

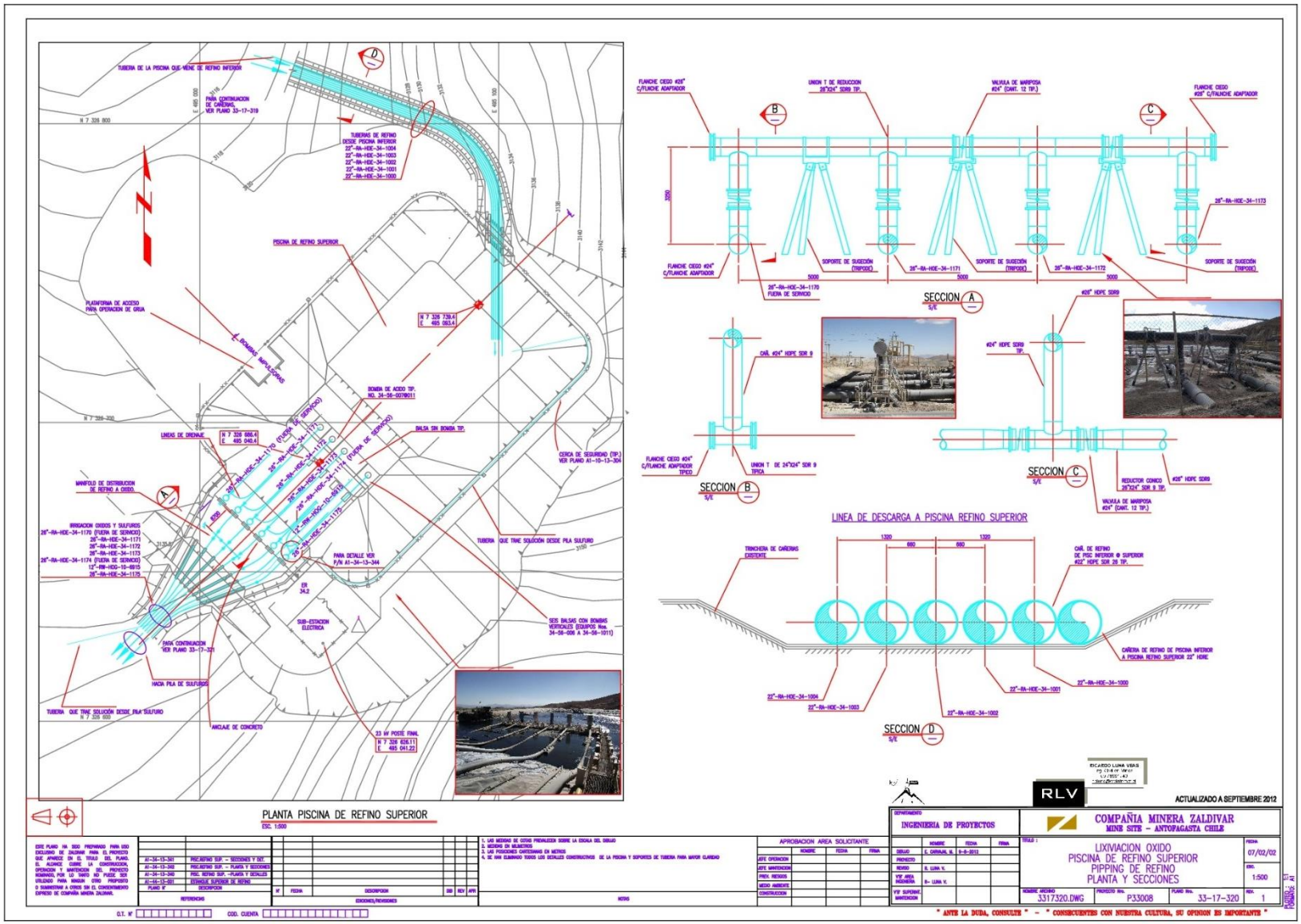
[18] María Zabala Villanueva (2013). "*Comportamiento de la Recuperación de Cobre en una pila de Lixiviación a condiciones ambientales extremas"*. Valparaíso, Chile. Recuperado de http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-3000/UCE3009_01.pdf

11 ANEXOS

Anexo A

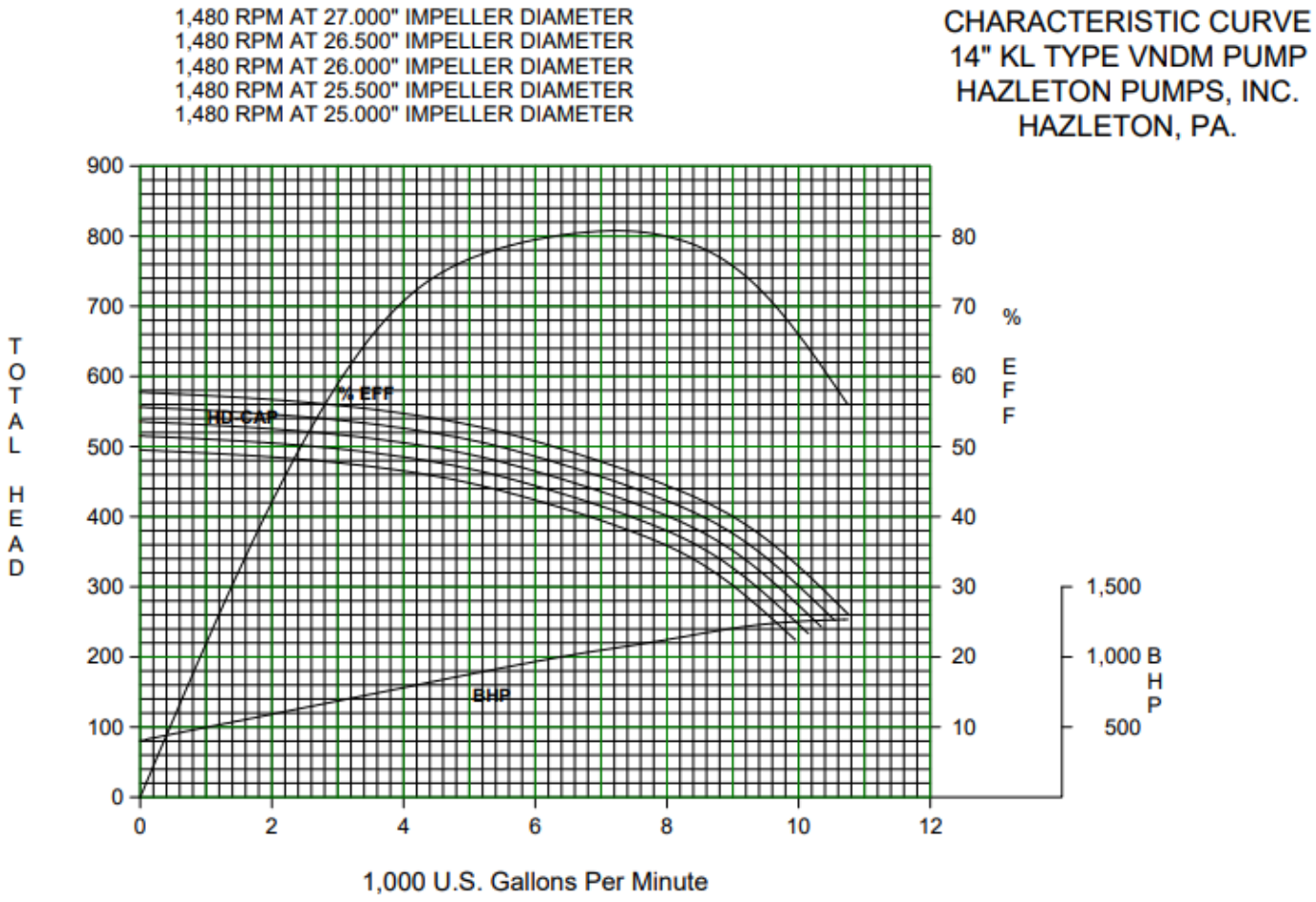

SIMBOLOGIA
PLANTA GENERAL PISCINA DE REFINO PROYECTADA
ESC. 1:500
RLV
ACTUALIZADO A SEPTIEMBRE 2012
INGENIERIA DE PROYECTOS
COMPAÑIA MINERA ZALDIVAR
MINE SITE - ANTOFAGASTA CHILE
SISTEMA DE LIXIVIACION
PISCINA DE REFINO DE SX
CANERIAS DE REFINO Y ACIDO AS-BUILT
PLANTA
07/02/02
1:500
3317316.DWG
P33008
33-17-316
1
" ANTE LA DUDA, CONSULTE " - " CONSECUENTES CON NUESTRA CULTURA, SU OPINION ES IMPORTANTE "

Anexo B

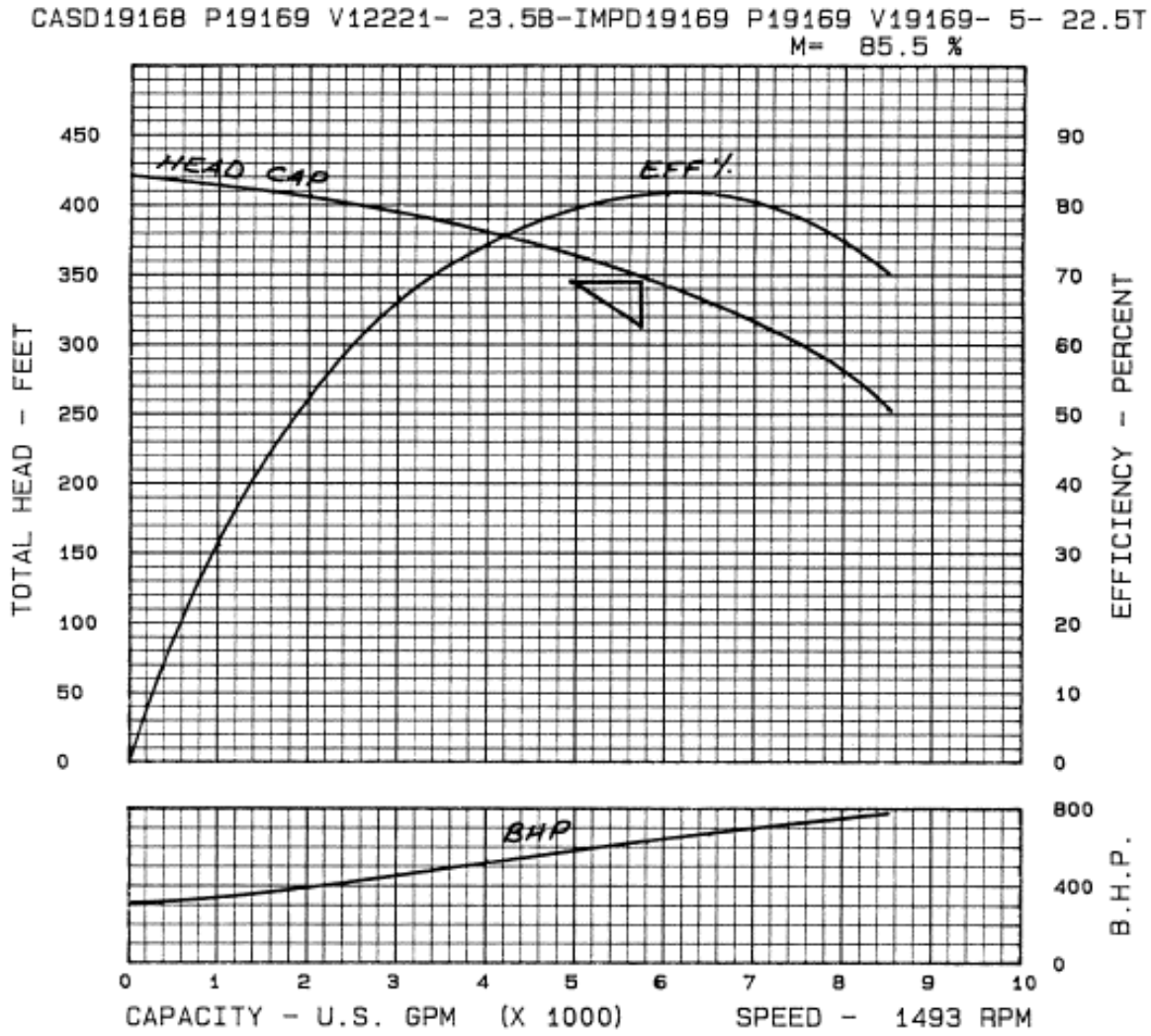

PLANTA PISCINA DE REFINO SUPERIOR
ESC. 1:500
LINEA DE DESCARGA A PISCINA REFINO SUPERIOR
SECCION A
SECCION B
SECCION C
SECCION D
COMPAÑIA MINERA ZALDIVAR
MINE SITE - ANTOFAGASTA CHILE
INGENIERIA DE PROYECTOS
LIXIVIACION OXIDO
PISCINA DE REFINO SUPERIOR
PIPPING DE REFINO
PLANTA Y SECCIONES
ACTUALIZADO A SEPTIEMBRE 2012
RLV
3317320.DWG
P33008
33-17-320
07/02/02
1:500
* ANTE LA DUDA, CONSULTE * - * CONSECUENTES CON NUESTRA CULTURA, SU OPINION ES IMPORTANTE *

Anexo C

HAZLETON PUMPS, INC.



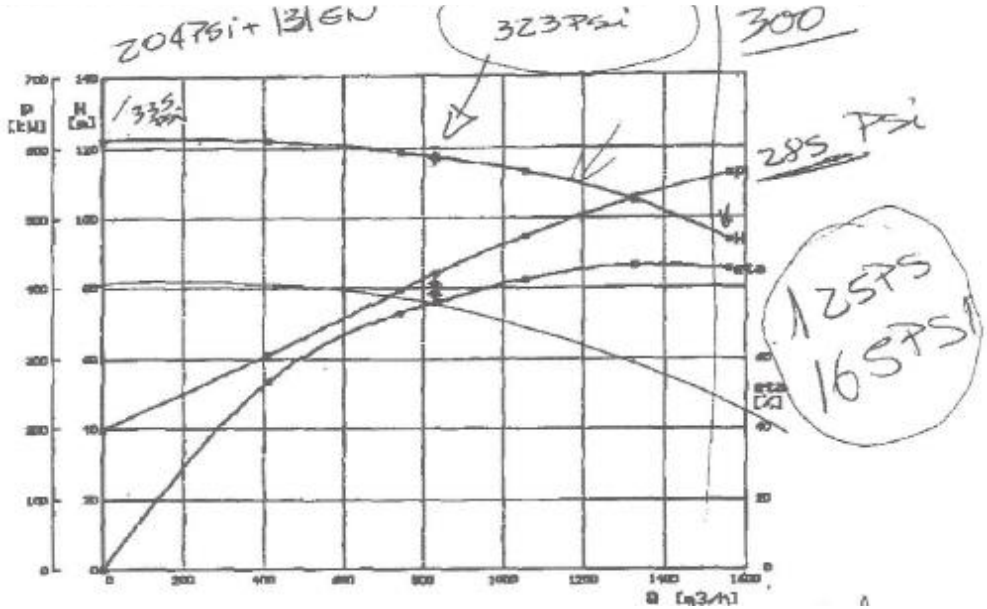
Anexo D


CASD19168 P19169 V12221- 23.5B-IMPD19169 P19169 V19169- 5- 22.5T
M= 85.5 %
HEAD CAP
EFF %
BHP
TOTAL HEAD - FEET
EFFICIENCY - PERCENT
B.H.P.
CAPACITY - U.S. GPM (X 1000)
SPEED - 1493 RPM

Anexo E

Vogel Pumps – ITT Goulds Pumps Chile

Bomba CPR 300-250-600



Anexo F

Dia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58
01-feb					1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
02-feb					1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
03-feb					1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
04-feb					1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
05-feb					1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
06-feb					1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
07-feb					1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
08-feb					1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
09-feb					1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10-feb					1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11-feb					1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12-feb					1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13-feb					1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14-feb					1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15-feb					1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16-feb					1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
17-feb					1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
18-feb					1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
19-feb					1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
20-feb					1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21-feb					1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22-feb					1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
23-feb					1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
24-feb					1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25-feb					1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
26-feb					1	1	3	3	3	3	3	3	3	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
27-feb					1	1	3	3	3	3	3	3	3	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
28-feb					1	1	3	3	3	3	3	3	3	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Solución de Refino = 3

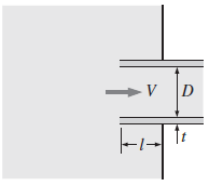
Solución IPLS = 1

59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				CARGA					ROT											3	3	3	3	3	3			
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			CARGA					ROT													3	3	3	3			
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				CARGA				ROT													3	3	3	3			
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			CARGA					ROT												3	3	3	3			
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			CARGA					ROT												3	3	3	3			
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			CARGA					ROT												3	3	3	3			
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				CARGA				ROT												3	3	3	3			
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				CARGA				ROT												3	3	3	3			
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			CARGA				ROT												3	3	3	3			
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			CARGA				ROT												3	3	3	3			
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			CARGA				ROT														3	3			
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				CARGA			ROT														3	3		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				CARGA			ROT														3	3		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				CARGA			ROT														3	3		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				CARGA			ROT														3	3		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				CARGA			ROT														3	3		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			CARGA			ROT														3	3		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			CARGA			ROT														3	3		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			CARGA			ROT																	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			CARGA			ROT																	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		CARGA			ROT																	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		CARGA			ROT																	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		CARGA			ROT																	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		CARGA			ROT																	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	CARGA			ROT																	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	CARGA			ROT																	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	CARGA			ROT																	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	CARGA			ROT																	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			CARGA	ROT																	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			CARGA	ROT																	

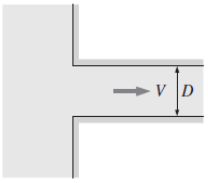
Anexo G

Coeficientes de pérdida K_L de varios accesorios de tubería para flujo turbulento

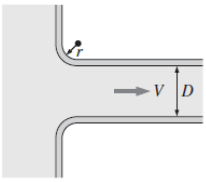
Entrada de la tubería
Reentrante: $K_L = 0.80$
($t \ll D$ y $l \approx 0.1D$)



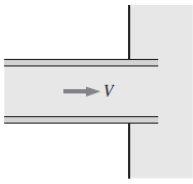
De borde agudo: $K_L = 0.50$



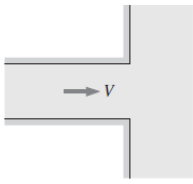
Redondeada ($r/D > 0.2$): $K_L = 0.03$
Ligeramente redondeada ($r/D = 0.1$): $K_L = 0.12$
(véase figura 8-36)



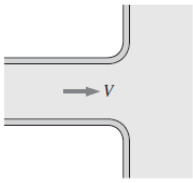
Salida de la tubería
Reentrante: $K_L = \alpha$



De borde agudo: $K_L = \alpha$

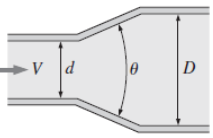


Redondeada: $K_L = \alpha$

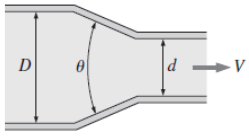


Expansión y contracción gradual (con base en la velocidad en la tubería de diámetro más pequeño)

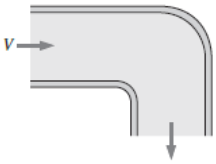
Expansión (para $\theta = 20°$):
$K_L = 0.30$ para $d/D = 0.2$
$K_L = 0.25$ para $d/D = 0.4$
$K_L = 0.15$ para $d/D = 0.6$
$K_L = 0.10$ para $d/D = 0.8$



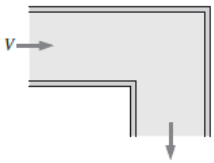
Contracción:
$K_L = 0.02$ para $\theta = 30°$
$K_L = 0.04$ para $\theta = 45°$
$K_L = 0.07$ para $\theta = 60°$



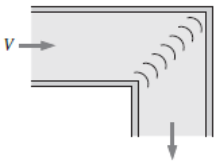
Codos y ramificaciones
Codo suave de 90°:
Embridado: $K_L = 0.3$
Enroscado: $K_L = 0.9$



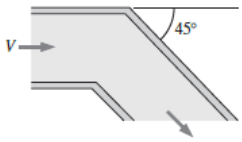
Codo esquinado de 90° (sin álabes directores):
$K_L = 1.1$



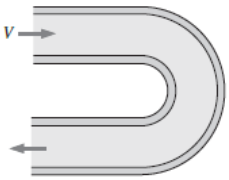
Codo esquinado de 90° (con álabes directores):
$K_L = 0.2$



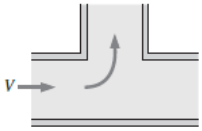
Codo enroscado de 45°:
$K_L = 0.4$



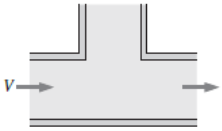
Codo de retorno de 180°:
Embridado: $K_L = 0.2$
Enroscado: $K_L = 1.5$



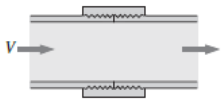
Conexión en T (flujo deriv.):
Embridado: $K_L = 1.0$
Enroscado: $K_L = 2.0$



Conexión en T (flujo en línea):
Embridado: $K_L = 0.2$
Enroscado: $K_L = 0.9$



Unión enroscada:
$K_L = 0.08$



Válvulas
Válvula de globo, totalmente abierta: $K_L = 10$
Válvula de ángulo, totalmente abierta: $K_L = 5$
Válvula de bola, totalmente abierta: $K_L = 0.05$
Válvula de charnela: $K_L = 2$

Válvula de compuerta, totalmente abierta: $K_L = 0.2$
$\frac{1}{4}$ cerrada: $K_L = 0.3$
$\frac{1}{2}$ cerrada: $K_L = 2.1$
$\frac{3}{4}$ cerrada: $K_L = 17$

Anexo H

```
Sub SolverLaterales()
'SolverLaterales Macro

Sheets("sistema completo ramifi").Select
Range("C5").Select
Dim i As Integer

For i = 0 To 637

        Selection.Copy
        Sheets("Euler (3)").Select
        Range("R2").Select
        Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False, Transpose:=False
        SolverSolve (True)
        Range("C4").Select
        Selection.Copy
        Sheets("sistema completo ramifi").Select
        Range("$D$" & (5 + i)).Select
        Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False, Transpose:=False
        Sheets("Euler (3)").Select
        Range("G93").Select
        Selection.Copy
        Sheets("sistema completo ramifi").Select
        Range("$F$" & (5 + i)).Select
        Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False, Transpose:=False
        Sheets("Euler (3)").Select
        Range("I95").Select
        Application.CutCopyMode = False
        Selection.Copy
        Sheets("sistema completo ramifi").Select
        Range("$H$" & (5 + i)).Select
        Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False, Transpose:=False
        ActiveCell.Offset(1, -5).Select

Next i

End Sub
```

Anexo I

```
Sub SolverRefinoRamif()
' SolverRefinoRamif Macro

Dim i As Integer
Dim j As Integer
Sheets("sistema completísimo").Select
Range("m3").Select

For j = 0 To 7

Selection.Copy
Sheets("sistema completo ramifi").Select
Range("C3").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False, Transpose:=False

For i = 0 To 40
Selection.Copy
Sheets("Euler (3)").Select
Range("R2").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False, Transpose:=False
SolverSolve (True)
Range("C4").Select
Selection.Copy
Sheets("sistema completo ramifi").Select
Range("$D$" & (3 + i)).Select
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False,Transpose:=False
    Sheets("Euler (3)").Select
    Range("G305").Select
    Selection.Copy
    Sheets("sistema completo ramifi").Select
    Range("$F$" & (3 + i)).Select
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False, Transpose:=False
    Sheets("Euler (3)").Select
    Range("I327").Select
    Application.CutCopyMode = False
    Selection.Copy
    Sheets("sistema completo ramifi").Select
    Range("$H$" & (3 + i)).Select
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks :=False,Transpose:=False
    ActiveCell.Offset(1, -5).Select
```

Continua en página siguiente

Continuación

```
  Next i
  Sheets("sistema completo ramifi").Select
  Range("p42").Select
  Selection.Copy
  Sheets("sistema completísimo").Select
  Range("$d$" & (3 + j)).Select
  Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False, Transpose:=False
  Sheets("sistema completo ramifi").Select
  Range("c43").Select
  Selection.Copy
  Sheets("sistema completísimo").Select
  Range("$n$" & (3 + j)).Select
  Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False, Transpose:=False
  Sheets("sistema completo ramifi").Select
  Range("d3").Select
  Selection.Copy
  Sheets("sistema completísimo").Select
  Range("$p$" & (3 + j)).Select
  Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False,Transpose:=False
  ActiveCell.Offset(1,-3).Select

Next j
End Sub
```