

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAISO – CHILE



Diseño e implementación de una planta piloto semiindustrial de electroobtención de cobre

Javiera Carola Romero Villar

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL
MECÁNICA

Profesora Guía: Dr. Ing. Sheila Lascano Farak

Profesora Correferente: Dr. Carolina Parra González

07 de diciembre 2022

Agradecimientos

A mi mamá por darme soporte durante este periodo y toda la vida. A mis abuelos Blanca y Sergio por ser mi hogar durante el ciclo universitario.

A atletismo USM por permitirme el atletismo en esta etapa de mi vida. Gracias por darme las mejores experiencias y por ser el espacio que necesité.

A nanobio USM, por mostrarme y enseñarme una manera diferente, profunda y hermosa de contribuir por el planeta.

Al equipo Fondef, profesora Sheila, profesora Carolina, Feña y Fernando.

A todos aquellos con los que compartí una mesa o una reunión digital mientras escribía este informe: Fabian, Romina, Chio, Sebastián, Jorge.

A Alfonso, por ti no caeré nunca.

Resumen

La electroobtención es la etapa final del proceso extractivo hidrometalúrgico de óxidos de cobre cuyo producto corresponde a cátodos de cobre electroobtenidos con un 99,99% pureza. Este proceso tiene lugar en instalaciones llamadas celdas electrolíticas en cuyo interior se disponen placas metálicas sumergidas en una solución ácida con iones de cobre disueltos en él, el electrolito. Estas placas corresponden a cátodos de acero inoxidable y ánodos de aleación de plomo ubicados de manera intercalada. La cosecha de cobre es posible debido a una corriente continua de baja intensidad entre cátodos y ánodos que desencadena una serie de reacciones electroquímicas cuyo producto final consiste en una gruesa capa de cobre puro sólido sobre la superficie del cátodo.

Una de las principales problemáticas de este proceso es la gran cantidad de energía eléctrica requerida para llevar a cabo las reacciones electroquímicas. Este consumo, que rodea los 2 kWh/kgCu, equivale a un 80% del consumo total del proceso de electroobtención. Por otro lado, los ánodos de plomo generan borra anódica, un desecho producido por el desprendimiento de las capas de óxido de plomo de la superficie de los ánodos y que generan un problema de contaminación y logística.

Bajo estas premisas, un grupo de investigación del Laboratorio de Nanobiomateriales de la Universidad Federico Santa María ha desarrollado un ánodo nanoestructurado para realizar electroobtención de cobre con una reducción significativa del consumo energético ($\sim 30\%$ en escala $12 \times 8 \text{ cm}^2$) y sin generación de residuos con contenido de metales pesados. Actualmente dicho proyecto se encuentra en una segunda etapa de desarrollo, cuyos desafíos consisten en escalar esta tecnología a una escala semi-industrial (ánodos de $50 \times 50 \text{ cm}^2$)

Por esta razón, ha sido requerido el diseño de una planta piloto escala semiindustrial para llevar a cabo pruebas con ánodos fabricados a partir de nanomateriales y materiales poliméricos en el desarrollo investigativo para avanzar hacia un proceso con menor consumo energético y una menor producción de desechos tóxicos como la borra anódica.

Abstract

Electrowinning is the final stage of the hydrometallurgical extractive process of copper oxides, the product of which corresponds to electrowinning copper cathodes with 99.99% purity. This process takes place in facilities called electrolytic cells, inside which metal plates are submerged in an acid solution with copper ions dissolved in it, the electrolyte. These plates correspond to stainless steel cathodes and lead alloy anodes located intercalated. The collection of copper is possible due to a direct current of low intensity between cathodes and anodes that triggers a series of electrochemical reactions, the final product of which consists of a thick layer of solid pure copper on the cathode surface.

One of the main problems of this process is the large amount of electrical energy required to carry out the electrochemical reactions. This consumption, which is around 2 kWh/kgCu, equals to the 80% of the total consumption of the electrowinning process. On the other hand, lead anodes generate anodic slimes, a waste produced by the detachment of lead oxide layers from the surface of the anodes, that generates contamination and logistics problems.

Under these premises, a research group from the Nanobiomaterials Lab of the UTFSM has developed a nanostructured anode to carry out copper electrowinning with a significant reduction of energy consumption (~30% on a 12 x 8 cm² scale) and without the generation of waste containing heavy metals. Currently the project is in a second stage of development, whose challenges consist in adapting this technology to a semi-industrial scale (anodes of 50 x 50 cm²).

For this reason, it has been required to design a semi-industrial scale pilot plant to carry out tests with anodes made from nanomaterials and polymeric materials, in the research development to move towards a process with lower energy consumption and less production of toxic waste, such as slime.

Tabla de contenido

AGRADECIMIENTOS.....	II
RESUMEN.....	III
ABSTRACT	IV
1. INTRODUCCIÓN	10
1.1. PROCESO PRODUCTIVO DEL COBRE	10
1.2. HIDROMETALURGIA: PROCESO LX-SX-EW	11
1.3. MERCADO NACIONAL DE COBRE	14
1.3.1. <i>Incidencia de la hidrometalurgia</i>	15
2. OBJETIVOS	17
2.1. OBJETIVOS GENERALES	17
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3. ELECTROOBTENCIÓN DE COBRE (EW).....	18
3.1. FUNDAMENTOS DE LA ELECTROOBTENCIÓN	18
3.2. ELECTROOBTENCIÓN INDUSTRIAL	19
3.2.1. <i>Configuración de la planta</i>	22
3.2.2. <i>Ánodo</i>	23
3.2.3. <i>Cátodo</i>	24
3.3. COMPOSICIÓN DEL ELECTROLITO	24
3.4. DENSIDAD DE CORRIENTE.....	25
3.5. OTROS PARÁMETROS OPERACIONALES	25
3.5.1. <i>Temperatura</i>	25
3.5.2. <i>Régimen de flujo</i>	25
3.6. CONSIDERACIONES ENERGÉTICAS (EFICIENCIA DE CORRIENTE)	26
3.7. BORRAS ANÓDICAS.....	27
3.8. CONTROL DE NIEBLA ÁCIDA	28
3.9. RECOPIACIÓN DE PARÁMETROS CLAVE	29
4. METODOLOGÍA DE DISEÑO	30
4.1. FASE 1: DISEÑO CONCEPTUAL	30
4.2. FASE 2: DISEÑO DE CONFIGURACIÓN	31
4.3. FASE 3: DISEÑO DETALLADO	31
5. DISEÑO CONCEPTUAL DE LA PLANTA PILOTO EW ESCALA SEMIINDUSTRIAL	32
5.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	32
5.1.1. <i>Lista de atributos</i>	32
5.1.2. <i>Lista de objetivos argumentada</i>	33
5.1.3. <i>Lista de objetivos con pesos ponderados</i>	34
5.2. ANÁLISIS FUNCIONAL	35
5.2.1. <i>Modelo de caja negra</i>	35
5.2.2. <i>Modelo de caja transparente</i>	36
5.2.3. <i>Benchmarking</i>	36
5.2.4. <i>Especificaciones de diseño</i>	38
5.2.5. <i>Matriz de requerimientos – objetivos</i>	39
5.3. GENERACIÓN DE CONCEPTOS.....	40
5.3.1. <i>Carta morfológica</i>	40
5.3.2. <i>Generación del concepto</i>	41
5.3.3. <i>Selección de conceptos</i>	45

6.	DISEÑO DE CONFIGURACIÓN.....	47
6.1.	ARQUITECTURA DEL DISEÑO	47
6.2.	DISEÑO DE CONFIGURACIÓN	49
6.2.1.	<i>Componentes estándar.....</i>	49
6.2.2.	<i>Componentes especializados</i>	58
6.3.	LAYOUT 3D PLANTA PILOTO	64
7.	DISEÑO DE DETALLE.....	66
7.1.	CONFIGURACIÓN MÓDULO DE CONTROL.....	66
7.1.1.	<i>Control de niebla ácida</i>	66
7.1.2.	<i>Control de temperatura</i>	67
7.2.	CONFIGURACIÓN MÓDULO DE PRE-OPERACIÓN	68
7.3.	CONFIGURACIÓN MÓDULO DE ELECTROOBTENCIÓN.....	72
7.3.1.	<i>Circuito eléctrico.....</i>	75
7.3.2.	<i>Fuente de poder</i>	77
7.3.3.	<i>Sistema de izaje.....</i>	78
7.4.	CONFIGURACIÓN MÓDULO DE SOPORTE	79
8.	IMPLEMENTACIÓN DE BANCO DE PRUEBAS	82
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	91
10.	REFERENCIAS	93
	ANEXOS.....	95
	ANEXO A: CÁLCULOS.....	95
	ANEXO B: PLANOS Y FICHAS	100

Lista de figuras

FIGURA 1.1 DIAGRAMA DEL PROCESO PRODUCTIVO DEL COBRE. FUENTE: ADAPTADO DE COCHILCO	11
FIGURA 1.2 DIAGRAMA DE FLUJO LX - SX – EW [4].	12
FIGURA 1.3 CONSUMO DE INSUMOS EN LA MINERÍA DE COBRE 2011 Y 2020 [10]	16
FIGURA 3.1 DIAGRAMA DE REACCIÓN QUÍMICA EN EW [12].....	19
FIGURA 3.2 CIRCUITO EQUIVALENTE DE LA INTERACCIÓN DE UN ÁNODO Y UN CÁTODO [12].....	20
FIGURA 3.3 VISTAS DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA [9].....	21
FIGURA 3.4 CONFIGURACIÓN DE NAVE EW CON BARRAS INTERCELDA WALKER [13].....	22
FIGURA 3.5 CIRCUITO ELÉCTRICO EQUIVALENTE CON BARRAS INTERCELDA WALKER [13]	23
FIGURA 4.1 MORFOLOGÍA DE DISEÑO [22].	30
FIGURA 5.1 MODELO DE CAJA NEGRA.	35
FIGURA 5.2 MODELO DE CAJA TRANSPARENTE.	36
FIGURA 5.3 PLANTA DE PILOTAJE INDUSTRIAL EWTECH [23].....	37
FIGURA 5.4 CONCEPTO 1.....	43
FIGURA 5.5 CONCEPTO 2.....	44
FIGURA 5.6 CONCEPTO 3.....	45
FIGURA 6.1 DIAGRAMA DE COMPONENTES Y FUNCIONES.....	48
FIGURA 6.2 DISPOSICIÓN FÍSICA DE LOS MÓDULOS DE DISEÑO.....	49
FIGURA 6.3 SWITCH DE NIVEL SELECCIONADO E INFORMACIÓN TÉCNICA	50
FIGURA 6.4. (A) SENSOR DE TEMPERATURA Y (B) VAINA PROTECTORA	51
FIGURA 6.5 CÁMARAS DE VIGILANCIA REMOTA	52
FIGURA 6.6 IMAGEN REFERENCIAL DEL EQUIPO CALEFACTOR	53
FIGURA 6.7 CURVA DE OPERACIÓN BOMBA ABAQUE HD50	55
FIGURA 6.8 DIMENSIONES BOMBA ABAQUE HD50.....	55
FIGURA 6.9 DIMENSIONES TECLE Y CARRO DE TIRO.....	57
FIGURA 6.10 SECCIÓN TRANSVERSAL VIGA IPE	58
FIGURA 6.11 MODELO CAMPANA DE EXTRACCIÓN	59
FIGURA 6.12 MODELO ESTANQUE DE ALMACENAMIENTO.....	60
FIGURA 6.13 MODELO CELDA ELECTROLÍTICA	61
FIGURA 6.14 MODELO INICIAL ESTRUCTURA DE SOPORTE.	63
FIGURA 6.15 LAYOUT PLANTA PILOTO.....	64
FIGURA 7.1 VENTILADOR CENTRÍFUGO DE ASPIRACIÓN SIMPLE ATEX SERIE CMPT(1)	66
FIGURA 7.2 REPRESENTACIÓN SISTEMA DE EXTRACCIÓN PARA EL CONTROL DE NIEBLA ÁCIDA.....	67
FIGURA 7.3 MODELO SOPORTE ANGULAR.....	68
FIGURA 7.4 UBICACIÓN DE EQUIPOS MÓDULO DE PRE-OPERACIÓN	69
FIGURA 7.5 ESTANQUE DE ALMACENAMIENTO CON TAPA REMOVIBLE.....	70
FIGURA 7.6 ANILLO ACRÍLICO PARA SUJECIÓN DE LOS CALEFACTORES.....	71
FIGURA 7.7 MODELO PIPING PLANTA.....	73
FIGURA 7.8 SISTEMA DE ENTRADA DE FLUJO A LA CELDA.....	74
FIGURA 7.9 FLANGE DE PVC CON MANGUITO.....	75
FIGURA 7.10. CONFIGURACIÓN ELÉCTRICA DE ELECTRODOS. A) UTILIZACIÓN DE 1 ÁNODO PARA COSECHAR EN SOLO UNA CARA DE 2 CÁTODOS. B) UTILIZACIÓN DE 1 ÁNODO PARA COSECHAR EN UNA CARA DE 1 CÁTODO. C) UTILIZACIÓN DE 3 ÁNODOS PARA COSECHAR EN AMBAS CARAS DE 2 CÁTODOS. D) DIAGRAMA ELÉCTRICO DE (c)	76
FIGURA 7.11 PLETINA DE COBRE PARA PUENTE ELÉCTRICO	77
FIGURA 7.12 DISEÑO SUMINISTRO ELÉCTRICO.....	78

FIGURA 7.13 PLANOS FRONTAL Y LATERAL A) CELDA ELECTROLÍTICA B) ESTANQUE DE ALMACENAMIENTO	79
FIGURA 7.14 A) ESFUERZO NORMAL MÁXIMO B) DESPLAZAMIENTO POR DEFLEXIÓN	80
FIGURA 8.1 DE ARRIBA A ABAJO E IZQUIERDA A DERECHA: CALEFACTOR, CELDA ELECTROLÍTICA, ESTANQUE DE ALMACENAMIENTO, ESTRUCTURA, CAMPANA DE EXTRACCIÓN.	82
FIGURA 8.2 INSTALACIÓN DEL PIPING.....	83
FIGURA 8.3 INSTALACIÓN CAMPANA EXTRACTORA	84
FIGURA 8.4 CONEXIONES ELÉCTRICAS MONOFÁSICAS Y TRIFÁSICAS	85
FIGURA 8.5 INSTALACIÓN DE CALEFACTORES.....	86
FIGURA 8.6 SENSORES DE TEMPERATURA	86
FIGURA 8.7 SENSOR DE NIVEL	87
FIGURA 8.8 TRASVASIJE DE ELECTROLITO	88
FIGURA 8.9 MONTAJE DE CÁTODO	89
FIGURA 8.10 CONEXIONES ELÉCTRICAS	89
FIGURA 8.11 BANCO DE PRUEBAS DE EW ESCALA SEMI-INDUSTRIAL	90

Lista de tablas

TABLA 1.1 PRODUCCIÓN DE LA MINERÍA DE COBRE EN CHILE [10].....	14
TABLA 1.2 PRODUCCIÓN DE REFINADO DE COBRE EN CHILE POR CÁTODOS SX-EW [10]	15
TABLA 3.1 COMPOSICIÓN DEL ELECTROLITO EN PLANTAS EW EN CHILE	27
TABLA 3.2 COMPOSICIÓN DE LA BORRA ANÓDICA TÍPICA EN LA INDUSTRIA CHILENA	28
TABLA 3.3 PARÁMETROS OPERACIONALES CLAVE PARA LA OPERACIÓN	29
TABLA 5.1 ATRIBUTOS DE DISEÑO	33
TABLA 5.2 LISTA DE OBJETIVOS ARGUMENTADA.....	33
TABLA 5.3 LISTA DE OBJETIVOS CON PESOS PONDERADOS	34
TABLA 5.4 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO	38
TABLA 5.5 MATRIZ DE REQUERIMIENTOS – OBJETIVOS	40
TABLA 5.6 CARTA MORFOLÓGICA	41
TABLA 5.7 SELECCIÓN DE CONCEPTO A TRAVÉS DEL MÉTODO DE PESOS PONDERADOS.....	46
TABLA 6.1 ESPECIFICACIONES SENSOR DE TEMPERATURA	51
TABLA 6.2 SELECCIÓN DE BOMBA PERISTÁLTICA.....	54
TABLA 6.3 LISTADO DE PARTES.....	64

1. Introducción

El cobre se encuentra naturalmente en rocas, plantas, animales, agua, sedimentos y en el aire. Está presente de forma natural en la corteza terrestre en una concentración de aproximadamente 67 partes por millón. La mayoría de las minas tienen concentraciones de cobre que oscilan entre 0,2 y 0,8% [1]. Es un metal de aspecto metálico brillante, de un color rojo anaranjado, particularmente resistente a la corrosión, que además tiene buena conductividad térmica y eléctrica. Estas propiedades entre otras han hecho del cobre uno de los metales más utilizados y que tiene usos diversificados.

Es uno de los primeros metales en ser dominado por el ser humano, hace millones de años bajo la forma de cobre nativo de alta pureza fácil de encontrar en la superficie terrestre. Sin embargo, hoy en día el mineral ya no es tan fácil de obtener. Los yacimientos superficiales ya se encuentran prácticamente agotados en el planeta, por lo que en la actualidad hay que buscarlo disperso en grandes áreas y mezclado con rocas estériles y otros minerales.

El cobre suele estar presente en forma de minerales. Según datos de la Corporación Nacional del Cobre, CODELCO, el cobre se puede encontrar principalmente como minerales sulfurados y óxidos. Los minerales sulfurados se originan en el magma de fuentes termales subterráneas y emergen a la superficie debido a los movimientos tectónicos. Suelen ser mezclas de sulfuros de cobre y hierro, combinados con compuestos de diferentes elementos, siendo los más importantes en las minas chilenas calcopirita, bornita, enargita y tetraedrita. Por otro lado, los minerales oxidados se originan en la descomposición y oxidación de los minerales sulfurados cerca de la superficie. En las minas chilenas los minerales oxidados más comunes son la malaquita, azurita, antlerita, crisocola y atacamita [2].

1.1. Proceso productivo del cobre

El proceso productivo consiste en la serie de procedimientos necesarios para conseguir cobre en alta concentración, es decir, libre de la mayor cantidad de impurezas posibles. Este proceso inicia desde la explotación de los minerales en los yacimientos mineros, hasta la obtención de mineral concentrado o producción de cátodos. La Figura 1.1 ilustra los diferentes procesos existentes con su respectivo producto para comercialización.

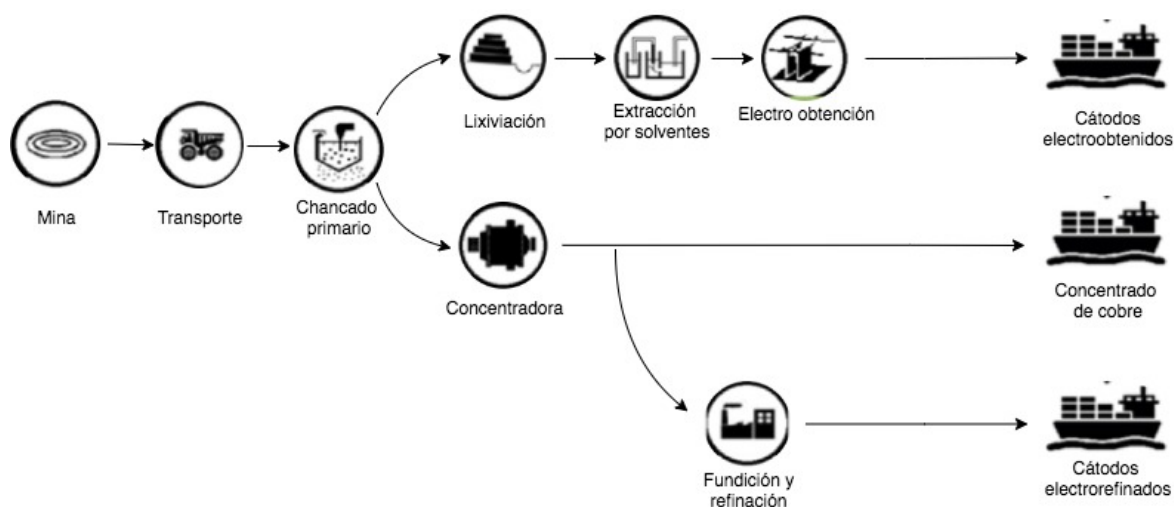


Figura 1.1 Diagrama del proceso productivo del cobre. Fuente: Adaptado de Cochilco

1.2. Hidrometalurgia: proceso LX-SX-EW

La hidrometalurgia corresponde a un método de extracción utilizado desde el siglo XVII, que consiste en la utilización de métodos acuosos para la extracción de los metales desde los minerales con los que se encuentra mezclado [3].

El mayor incentivo para desarrollar tecnológicamente los procesos hidrometalúrgicos provenía del hecho que no era posible concentrar los minerales oxidados de cobre en la operación convencional de flotación. Actualmente, existe el incentivo adicional de evitar la contaminación ambiental causada por los procesos metalúrgicos convencionales basados en fundiciones. Alrededor del 20% de la producción primaria de cobre proviene desde el proceso de hidrometalurgia de minerales oxidados de cobre [4], este es recuperado en las tres etapas que contempla este proceso: lixiviación (LX), extracción por solventes (SX) y electroobtención (EW). El producto final corresponde a cátodos electroobtenidos con un 99,9% de pureza.

La lixiviación es un proceso químico mediante el cual se disuelven los compuestos de cobre en sales solubles mediante la penetración de un solvente lixivante. Actualmente, se utiliza la tecnología de lixiviación en pilas TL, la que se caracteriza por la mayor trituración a que se someten los minerales en comparación a tecnologías de LX anteriores [5]. En esta etapa el cobre es disuelto en una solución acuosa, que corresponde actualmente a una solución de ácido sulfúrico. La lixiviación en pilas consiste en la formación de montones de minerales pretratados en dicha solución, la cual se va enriqueciendo de mineral durante la percolación de las pilas, siendo recogida en el fondo para pasar a la próxima etapa del proceso. Para minerales sulfurados se aplica la biolixiviación, la cual se aplica a depósitos con bajo contenido de metales útiles y residuos de tratamientos anteriores. El descubrimiento de esta actividad se realizó a mediados del siglo XX y su aplicación a escala se atribuye a Kennecott Copper Corporation.

La solución obtenida de LX posee poca concentración de cobre ($1 - 6 \text{ kg Cu/m}^3$) y demasiadas impurezas ($1 - 10 \text{ kg Fe/m}^3$) [5], por lo que no es viable ser directamente

electrodepositada y lograr obtener un alto grado de pureza. El siguiente paso, la extracción por solventes, proporciona los medios para producir electrolito puro, con alto contenido de cobre a partir de una solución de lixiviación cargada, diluida e impura. Para ello, en primer lugar, se adiciona un extractor orgánico líquido específico para el cobre, provocando la extracción del cobre de la solución proveniente de la lixiviación. Estos dos fluidos son separados por gravedad, enviando la solución de lixiviación de vuelta a su proceso de origen. Posteriormente, este nuevo fluido se pone en contacto con un electrolito de ácido sulfúrico de fuerte concentración, causando que el cobre sea recuperado por este nuevo fluido desde el reactivo orgánico. Finalmente, son nuevamente separados por gravedad para enviar el fluido final hacia la electroobtención. La figura 1.2 corresponde a la representación de los procesos descritos.

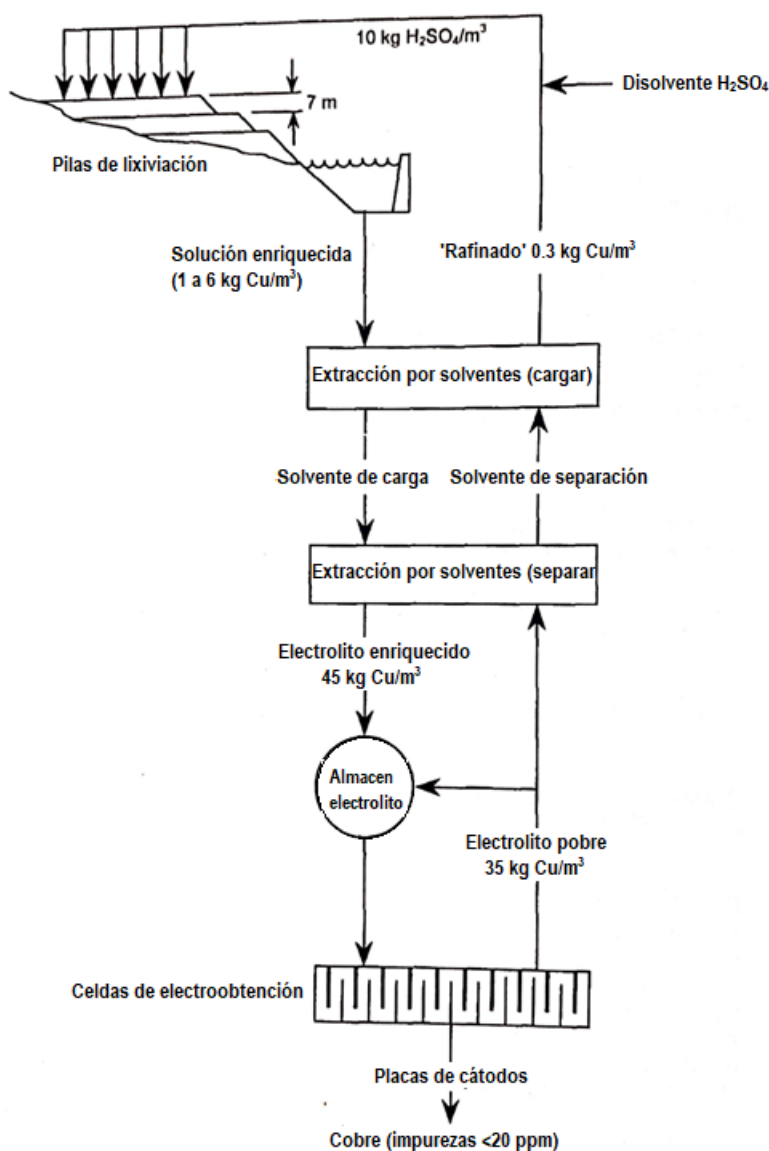


Figura 1.2 Diagrama de flujo LX - SX – EW [4].

Los procesos Lx-Sx producen un electrolito de sulfato de cobre, ácido sulfúrico y agua altamente enriquecida en iones de cobre (Cu^{2+}). El proceso de electroobtención consiste en recuperar el metal desde dicha solución y depositarlo en cátodos utilizando un proceso de electrólisis. Esto implica, en primer lugar, la inmersión de cátodos metálicos y ánodos inertes, pero conductores, en la solución electrolítica procedente del proceso anterior; para, posteriormente, aplicar un potencial eléctrico entre el ánodo y el cátodo; finalmente, y en consecuencia de la aplicación de dicho potencial, ocurre el revestimiento de cobre metálico puro desde el electrolito a los cátodos. Los conceptos fundamentales para lograr llevar a cabo el proceso de EW radican en la cinética de reacción, el fenómeno de transferencia de masa, la termodinámica y otros modelos electroquímicos específicos [6]. En el capítulo 3 se explica con mayor detalle el funcionamiento y diseño teórico y práctico de una planta de electroobtención.

Ahora, centrándose en el desarrollo de las tecnologías de hidrometalurgia en la minería chilena, existe el antecedente de la mina Lo Aguirre, perteneciente a Sociedad Minera Pudahuel (SMP), que en la década de 1980, se convirtió en la primera faena en el mundo en aplicar a escala comercial el proceso de lixiviación en pilas TL para minerales oxidados de cobre y mediante bacterias para los sulfurados de cobre presentes en el mismo mineral, así como la primera en Chile en usar el proceso de extracción por solventes y electroobtención de cobre [7]. La investigación y desarrollo que se efectuó en Lo Aguirre permitió finalmente tratar en forma simultánea y sucesiva en una misma instalación minerales oxidados y sulfurados, que según los procesos clásicos se hubiesen requerido dos rutas tecnológicas distintas, significando una duplicación de las inversiones.

El proceso LX-SX-EW se convierte en la innovación tecnológica que marcaría el gran quiebre en la producción cuprífera de la década de 1990 por sus bajos costos de capital y de operación, la alta calidad del cobre catódico producido y las ventajas de ser un proceso más limpio y que permite el procesamiento económico de minerales de muy baja ley. Así fue como a partir de 1996, con una producción de 635.700 toneladas de cátodos [8], Chile se convierte en el primer productor mundial de cobre vía SX-EW, desplazando a un segundo lugar a Estados Unidos, liderazgo que mantiene hasta hoy en día.

La electroobtención es similar a la electrefinación (proceso convencional para sulfuros de cobre), sus principales diferencias consisten en:

- (a) La EW utiliza ánodos insolubles fabricados en aleación de plomo en lugar de ánodos solubles de cobre.
- (b) La EW requiere de un potencial eléctrico de $\sim 2\text{V}$ en contraste con la electrefinación que requiere de $\sim 0,3\text{V}$.

Los ánodos insolubles de plomo tienen una duración mayor a 5 años, por lo que se genera menor cantidad de chatarra a partir de los ánodos en comparación a los ánodos solubles y además, se disminuye notoriamente la presencia de metales preciosos en las borras anódicas (desecho producido en los procesos de electrefinación) [9].

1.3. Mercado nacional de cobre

La minería de cobre es el motor económico más poderoso con el que cuenta la economía chilena actualmente, contando con empresas privadas y públicas de exploración y explotación minera. En términos económicos, el PIB del país generado por la actividad minera de cobre ha fluctuado alrededor del 10% en la última década, alcanzando un 9,4% del PIB país para el año 2020; 0,6% más que el año 2019, el más bajo de la última década. El año 2020, 51,7% de la exportación nacional correspondió a cobre fino. Por otro lado, la inversión en la gran minería de cobre realizada por las 20 principales empresas privadas del rubro, supero los 5.500 millones de US\$ en año 2020.

En tanto, en relación con el personal ocupado en minería, tanto por contratación directa de la empresa mandante o por empresas contratistas de la minería, el año 2020 se ocuparon 234.964 plazas de trabajo, lo que corresponde a un 2,93% del total de la ocupación a nivel país. Además, un 9,38% de las plazas en minería están actualmente ocupadas por mujeres, lo que corresponde a un aumento del 3% en ocupación femenina en comparación con el inicio de la década [10].

El cobre puede ser comercializado en diferentes formatos, dependiendo de su nivel de refinación. El concentrado de cobre, correspondiente al producto del proceso de flotación posee alrededor de un 30% de cobre; el cobre blíster, correspondiente a la fundición del concentrado posee un 96% de pureza aproximadamente; Y los productos que han completado su etapa de refinación, ya sean cátodos provenientes de procesos electrolíticos o productos refinados a fuego, alcanzan una pureza del 99,4-99,9% [10].

La producción de cobre en Chile alcanzó los 5.733 miles de TM de fino para el año 2020; la tabla 1.1 señala la cantidad de cobre fino producido en el inicio de las últimas dos décadas. Esta cantidad representa un 28% de la producción mundial, convirtiendo a Chile en el mayor productor de cobre en el mundo. De este total un 59,7% corresponden a productos de cobre refinación (por electrolíticos o refinados a fuego); un 7,9% está constituido por cobre blíster y un 32,4% por concentrado de cobre [10].

Tabla 1.1 Producción de la minería de cobre en Chile [10]

Año	Cantidad (miles de TM de fino)
2000	4.602,0
2010	5.418,9
2020	5.733,1

Para el año 2010 las exportaciones de cobre alcanzan el 56% de las exportaciones totales del país, mientras que para el 2019 llegan al 48% [10], siendo los principales compradores, China (cobre refinado y concentrado), Estados Unidos (cobre refinado), Europa (cobre refinado y concentrado) y Japón (concentrado de cobre). Por otro lado, del total de las exportaciones de cobre el año 2010 un 56% correspondía a cátodos de cobre obtenidos por procesos de electroobtención y electrorefinación. Para el 2019 esta cifra disminuyó al 37% [10].

1.3.1. Incidencia de la hidrometalurgia

En la tabla 1.2 se puede observar la evolución de la producción de cobre en Chile por medio de hidrometalurgia en los últimos 20 años, tanto la cantidad de mineral fino, como el porcentaje de incidencia en la producción de mineral refinado. Al comparar los datos observados en dicha tabla con los datos dispuestos en la Tabla 1.1, se puede establecer que la producción nacional de cobre fino correspondiente a refinado por proceso LX-SX-EW fluctúa alrededor de un 30% del total nacional. Esto ratifica el rol clave que ha tenido este tipo de tecnología en el desarrollo de la industria del cobre en Chile y su posicionamiento como principal productor mundial de este metal.

Tabla 1.2 Producción de refinado de cobre en Chile por cátodos SX-EW [10]

Año	Cantidad (miles de TM de fino)	Participación en la producción de refinado (%)
2000	1.372,3	51,4
2010	2.088,5	64,4
2020	1.467,5	63,0

Por otro lado, se analiza el consumo de insumos estratégicos en la minería por parte de los procesos hidrometalúrgicos. Estos insumos corresponden a agua continental (incluye ríos, lagos, llanuras de inundación, humedales, etc., descartando agua marina), energía eléctrica y combustible.

El año 2020 se consumieron 1.374 l/s de agua fresca en procesos hidrometalúrgicos, lo que corresponde a un 11,4% del consumo hídrico total en la minería. Solo superado por el consumo del proceso de concentración (58,7% del total) y por servicios asociados al uso de agua para la supresión de polvo en caminos, agua potable utilizada en campamentos, y de servicios auxiliares (19,1% del total). El consumo hídrico en hidrometalurgia se traduce en un gasto unitario de 0,021 m³ de agua/tonelada de cobre fino producido.

En relación con el consumo energético del proceso, este puede dividirse en consumo de energía eléctrica y consumo de combustibles. Para el primero de estos, el consumo total en minería de cobre para el año 2020 fue de 95.941 TJ, de los cuales 18.834,6 TJ correspondió a los procesos LX-SX-EW con un 19,6% del total, solo superado por los procesos de concentradora, los cuales se adjudican un 53% del consumo eléctrico total. El consumo eléctrico se traduce en un gasto unitario de 12.429,2 MJ/tonelada de fino producido en cátodos electroobtenidos. En cuanto al consumo de combustibles, los procesos de hidrometalurgia poseen un gasto total de 4.616,3 TJ el año 2020, equivalente a un 5,5% del consumo total correspondiente a 84.061 TJ [10].

La figura 1.3 contempla el consumo de insumos total en la minería de cobre, la implicancia de la hidrometalurgia y la comparación con los otros procesos para los años 2022 y 2011, con el objetivo de destacar la evolución del consumo en los últimos 10 años.

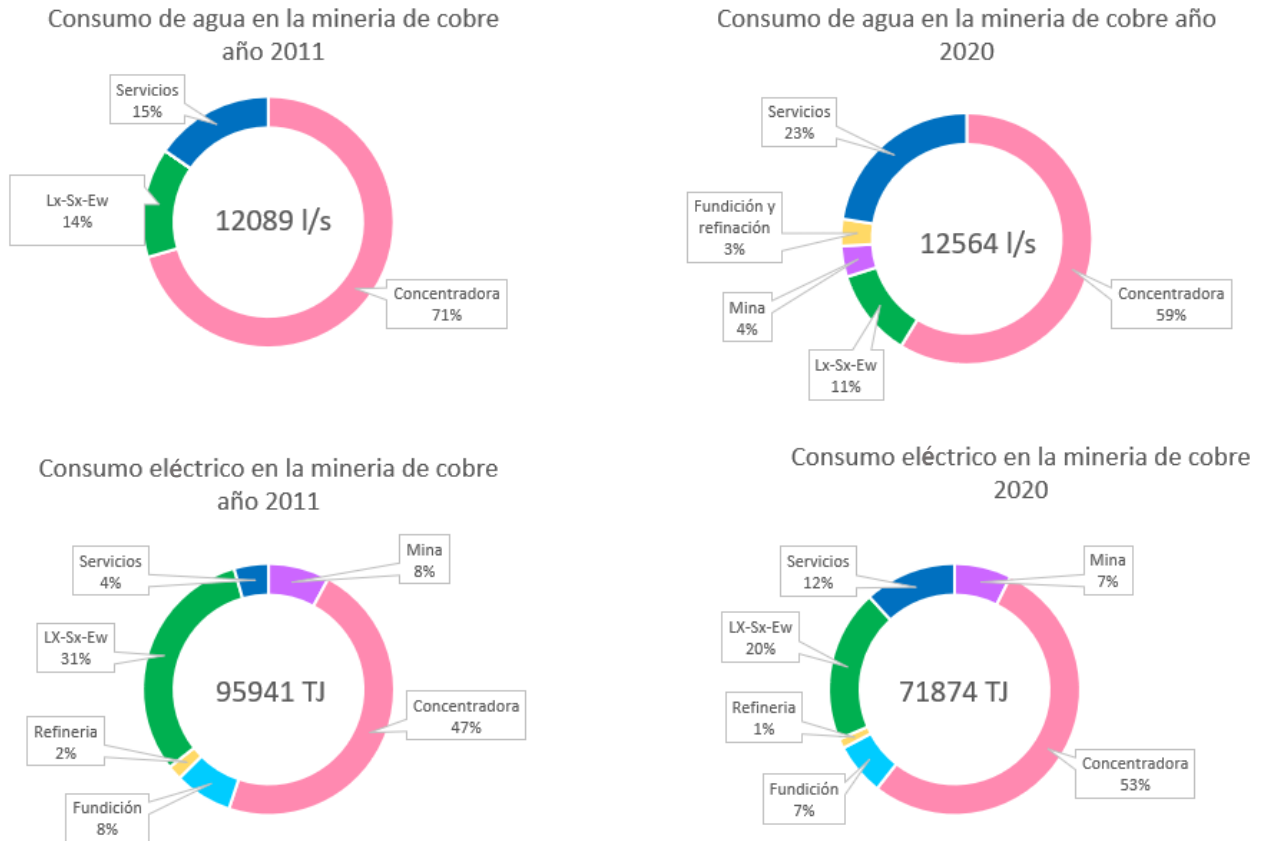


Figura 1.3 Consumo de insumos en la minería de cobre 2011 y 2020 [10]

En relación con el consumo de agua del año 2011, debido a cambio en el formato de las encuestas realizadas anualmente por Cochilco, no se disponen datos sobre el consumo hídrico de los procesos de mina (a rajo abierto y subterránea) y refinería y fundición. Aunque, podemos observar en el consumo del año 2020, que estos dos procesos no abarcan más del 10% del consumo total. Finalmente, se puede observar una disminución del consumo total de electricidad en los procesos mineros y en procesos LX-SX-EW específicamente. Aun así, se puede apreciar el alto consumo asociado a estos últimos.

En este contexto y considerando la importancia de optimizar los procesos con miras en los objetivos de desarrollo sostenible, es que el Laboratorio de investigación de nanobiomateriales de la Universidad Federico Santa María, bajo un proyecto FONDEF IDEa y el auspicio de la empresa Inppamet, ha desarrollado una tecnología de ánodos nanoestructurados para el proceso de EW de cobre con una reducción significativa del consumo energético. Los resultados obtenidos en la primera etapa del proyecto, donde el prototipo fue desarrollado a escala de 12 x 8 cm², confirmaron una reducción en la energía requerida para realizar EW de aproximadamente un 30% comparado con los ánodos comerciales de plomo. En una segunda etapa del proyecto se busca realizar un escalamiento de la tecnología a una escala de 50 x 50 cm². Debido al importante aumento del tamaño se requiere contar con un banco de pruebas que garantice la seguridad operacional y simule los parámetros utilizados en EW industrial.

2. Objetivos

2.1. Objetivos generales

Diseñar e implementar una planta semi-industrial para la electroobtención de refinado de cobre utilizando ánodos fabricados a partir de polímeros.

2.2. Objetivos específicos

Definir parámetros operacionales que afectan el funcionamiento y rendimiento de la planta piloto.

Comprender y relacionar los parámetros operacionales, el circuito y los requerimientos de funcionamiento de la planta.

Seleccionar equipos, componente y partes necesarios para el funcionamiento y monitoreo de la planta piloto.

Diseñar y validar el diseño de la planta piloto.

Implementar el diseño de la planta piloto.

3. Electroobtención de cobre (EW)

El proceso de electroobtención se ejecuta en instalaciones especializadas llamadas celdas electrolíticas, las cuales están equipadas con un sistema de circuito eléctrico para hacer circular una corriente continua de baja intensidad que entrega el potencial necesario para llevar a cabo la electrolisis. En el interior de dicha celda, se disponen placas metálicas sumergidas en una solución de ácido sulfúrico llamada electrolito, dichas placas corresponden alternadamente a cátodos y ánodos. La electrodeposición se ejecuta con cátodos permanentes de acero inoxidable y ánodos insolubles del plomo, con el objetivo de recuperar el cobre disuelto en el electrolito en la superficie del cátodo [9].

Los productos del EW son cobre puro sólido en la superficie del cátodo, burbujas de oxígeno en la superficie del ánodo y ácido sulfúrico regenerado en la solución electrolítica. Una vez finalizado el proceso el cobre es separado del electrodo, es lavado y queda listo para ser comercializado. Durante el proceso el oxígeno se eleva hacia la superficie y entra en contacto con el medio ambiente. Finalmente, el electrolito pobre con un mayor porcentaje de acidez es recirculado a la extracción por solventes donde el alto porcentaje de H^+ es intercambiado por Cu^{2+} fresco [11].

3.1. Fundamentos de la electroobtención

La electrodeposición se sustenta principalmente en dos fundamentos:

- Ley de Faraday: Establece que la cantidad de sustancia que se deposita sobre un electrodo es proporcional a la cantidad de corriente que pasa por la solución. El proceso de recolección de cobre se conoce como reducción y se lleva a cabo sobre la superficie del cátodo según la reacción fundamental de reducción en la cual el cobre disuelto en forma de ión es atraído a la superficie del cátodo por efecto de la adición de electrones, depositándose en la superficie de este como cobre neutro.



La contra reacción se lleva a cabo en el ánodo y se conoce como reacción fundamental de oxidación, en donde el agua se descompone sobre la superficie de este, dando lugar al desprendimiento de oxígeno. A su vez, se produce un agotamiento de cobre contenido en el electrolito, con un aumento de la acidez de este.



- Ley Nernst: Esta ley relaciona el potencial estándar de un electrodo (E°) con el potencial generado en dicho electrodo (ya sea cátodo o ánodo) y la actividad del electrolito en contacto con él con el objetivo de establecer el potencial necesario para llevar a cabo la electrolisis según se establece en la ecuación de Nernst:

$$E = E^\circ + \frac{RT}{nF} \ln (Q_a) \quad (3.3)$$

Donde Q_a corresponde a la relación entre la actividad de la reacción de reducción y la reacción de oxidación ($a_{\text{Red}}/a_{\text{Ox}}$) [11].

En el caso del cátodo se puede establecer que el potencial estándar posee un valor de $E^0 = 0,34\text{V}$. Por otro lado, para el ánodo se establece un potencial estándar de $E^0 = -1,23\text{V}$.

Para el proceso general de EW, se puede considerar un valor para $E^0 = 0,89\text{V}$. Además, se debe considerar una caída de tensión adicional requerida para hacer circular una densidad de corriente a través de un electrolito que posee una resistencia óhmica que es tanto mayor cuanto mayor es la separación entre los electrodos. Por otro lado, siguiendo la línea de las reacciones fundamentales de EW, se produce una acumulación de O_2 y H^+ en la vecindad del ánodo y un agotamiento de Cu^{2+} en la vecindad del cátodo, generándose un consumo energético por sobre el teórico debido a la polarización por concentración y desprendimiento de gases. Este proceso requiere de energía para conducir las reacciones, vencer la resistencia de la solución y compensar las pérdidas que se producen en el proceso (químicas, térmicas y eléctricas) [9]

La figura 3.1 consiste en un diagrama simplificado de las reacciones químicas que originan el proceso de EW y la interacción entre un ánodo y un cátodo dentro de la celda. Se puede apreciar el desprendimiento de oxígeno sobre la superficie del ánodo, la presencia de hidrógeno en el electrolito y la adhesión de los iones de cobre en la superficie del cátodo. Además, se puede identificar el flujo de corriente desde los cátodos hacia los ánodos.

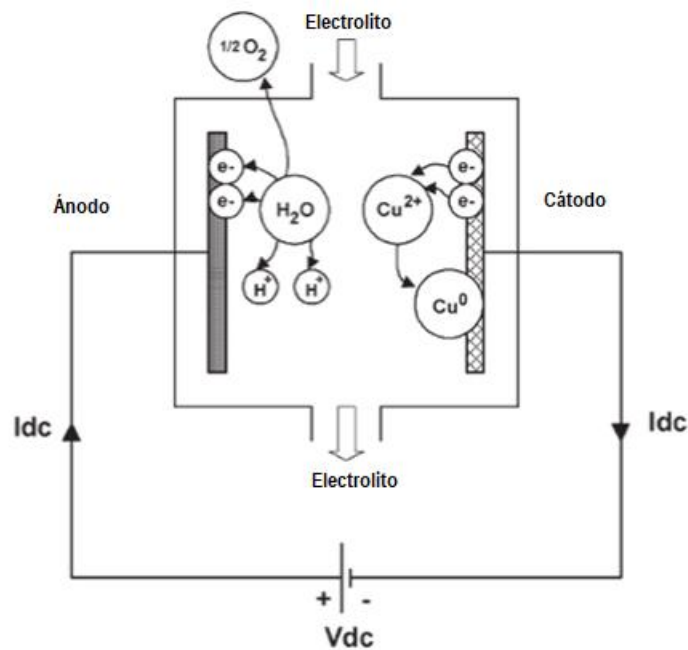


Figura 3.1 Diagrama de reacción química en EW [12].

3.2. Electroobtención industrial

En la gran minería el proceso de electroobtención tiene lugar en grandes instalaciones llamadas naves de EW, estas están dotadas con todos los equipos necesarios para realizar el proceso, desde la recepción del electrolito desde las naves Sx, hasta cosechar el cobre sólido

desde los cátodos. Las naves están equipadas con unidades llamadas celdas electrolíticas en donde se sitúan intercaladamente n cantidad de cátodos y n+1 cantidad de ánodos (en cada extremo del conjunto de electrodos se sitúa un ánodo para poder generar electrolisis en todas las caras de los cátodos). En la gran minería se utilizan celdas con capacidad para alrededor de 120 electrodos en total. Actualmente, dichas unidades son fabricadas en concreto polimérico con dimensiones aproximadas a 6 m de largo x 1,2 m de ancho x 1,4 m de profundidad (figura 3.2), las dimensiones exactas se ajustan a los requerimientos de cada proyecto y la disponibilidad en la zona de localización [11].

Los electrodos se sitúan dentro de la celda intercaladamente a una distancia que fluctúa alrededor de los 45 mm, de tal modo de disminuir al máximo la caída de tensión que se produce por la resistencia del electrolito, pero manteniendo una distancia suficiente para evitar cortocircuitos. En la figura 3.2 se puede observar un diagrama simplificado de la relación eléctrica entre un ánodo y un cátodo. Ambos se apoyan en ambas barras conductoras, pero se aísla el contacto con la barra que posee el polo opuesto al del electrodo. Debido a que las barras están expuestas al medio ácido y a la contaminación del entorno, el contacto entre la barra y el electrodo posee una resistencia por contacto que generalmente alcanza valores promedio de $60 \mu\Omega$ [12]. Esta relación se puede representar en el diagrama eléctrico observado en la imagen.

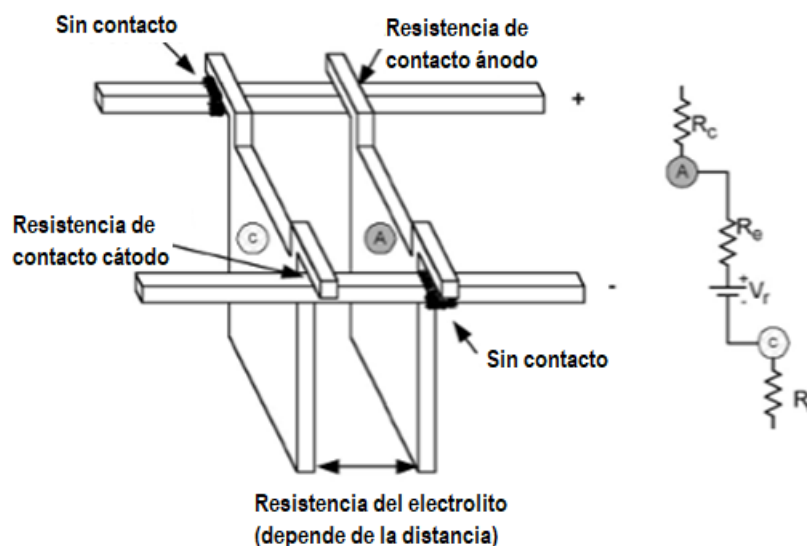


Figura 3.2 Circuito equivalente de la interacción de un ánodo y un cátodo [12].

El proceso de enchapado se efectúa durante 6 a 7 días de trabajo continuo. Al momento de la cosecha, el cobre se ha depositado en ambas caras del cátodo con un espesor de 3 a 4 centímetros y con un peso aproximado de 40 kg por cátodo [2]. La cosecha de todos los cátodos de una misma celda es realizada por una grúa, posteriormente son lavados con agua caliente para remover las impurezas de su superficie y se transporta a la máquina despegadora para separar el cobre del electrodo.

Cuando los cátodos son extraídos y reemplazados sin cortar el suministro de corriente eléctrica a la celda, es posible mantener la capa protectora del ánodo adherida a su superficie,

es decir, no precipita al fondo producto de la deselectrificación, de esta manera es posible minimizar la contaminación por plomo tanto de la electrodeposición como del electrolito y la celda y, además, maximiza la productividad [9].

La figura 3.2 corresponde a la vista frontal, lateral y superior de una celda electrolítica de dimensiones estándar. En esta, se puede observar el sistema de tuberías utilizado para abastecer de electrolito al sistema (colector) el cual posee una entrada superior para el ingreso de electrolito rico y una entrada un poco más abajo para el ingreso de electrolito pobre. Además, en la sección B-B de la figura se puede observar la tubería por donde ocurre la salida del electrolito de la celda (electrolito empobrecido).

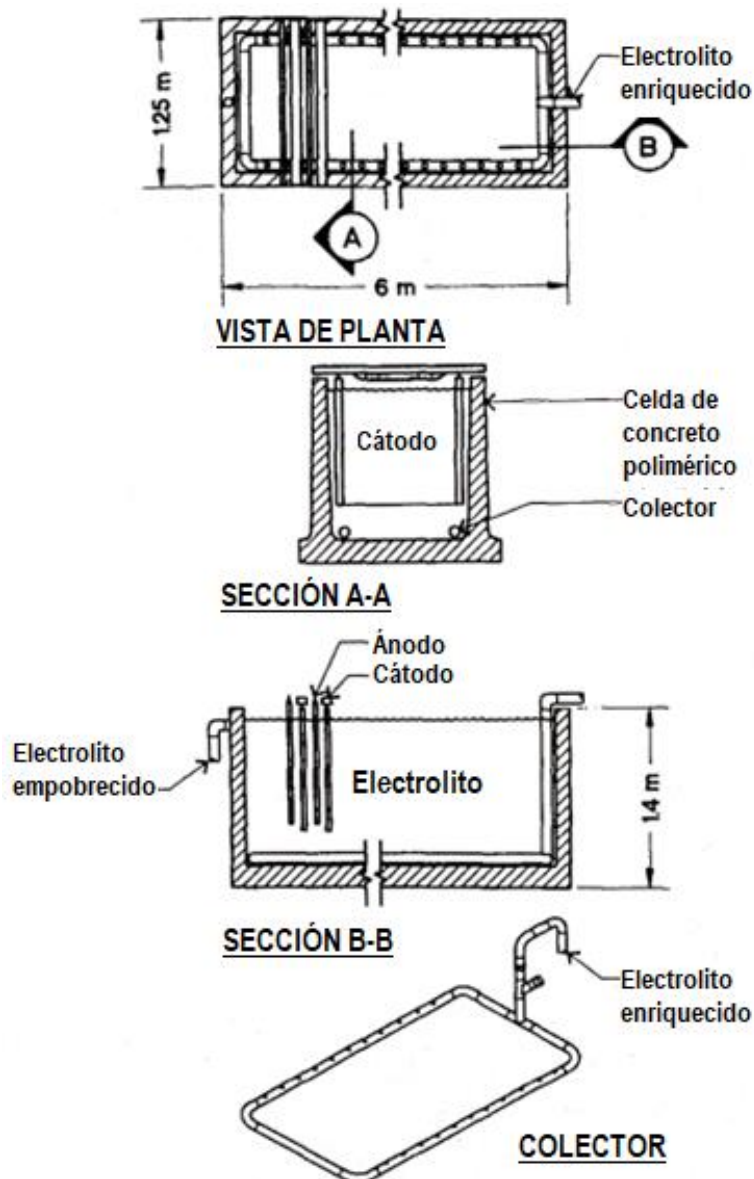


Figura 3.3 Vistas de una celda electrolítica [9]

3.2.1. Configuración de la planta

En las naves de electroobtención, las celdas electrolíticas se ubican una al lado de la otra y conectadas entre sí mediante barras intercelda, las que consisten en barras equipotenciales que conectan físicamente todos los cátodos de una celda con los ánodos de la celda contigua estableciendo una conexión en serie entre celdas. Dentro de las ventajas de este método podemos encontrar que es necesario conectar a la fuente de poder solo los extremos del banco de celdas para que toda la planta se electrifique. Aunque existen diversos tipos de barras conectoras, la más utilizada en la industria corresponde a las barras intercelda Walker. Estas, están diseñadas para garantizar un voltaje común para cada par de cátodo-ánodo en una celda, es decir, una configuración en paralelo entre cada par ánodo-cátodo dentro de una misma celda. En la figura 3.4 se puede observar un diagrama de la configuración dentro de la nave de 3 celdas electrolíticas conectadas por las barras intercelda donde se puede apreciar el circuito equivalente de esta configuración, para entender el proceso a nivel eléctrico (ver figura 3.2 para entender la relación eléctrica entre un par ánodo-cátodo).

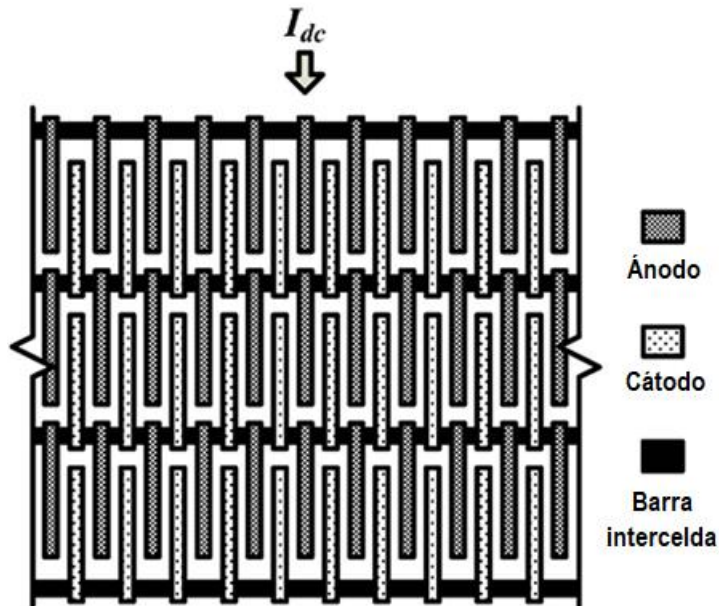


Figura 3.4 Configuración de nave EW con barras intercelda Walker [13]

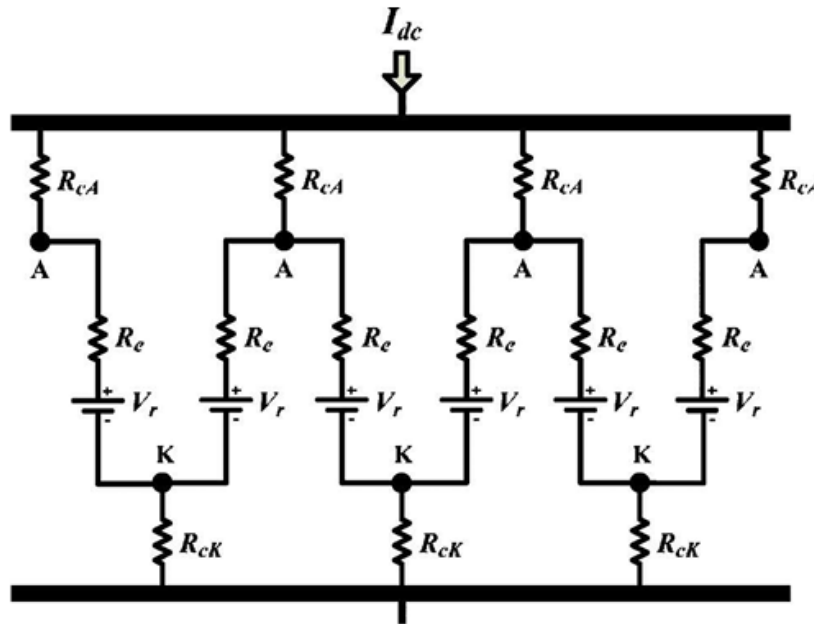


Figura 3.5 Circuito eléctrico equivalente con barras intercelda Walker [13]

3.2.2. Ánodo

El principal productor mundial de ánodos corresponde a la empresa Inppamet, que además posee una presencia del 98% en la producción anódica nacional [14]. El ánodo de mayor comercialización está conformado por una aleación de plomo, calcio y estaño, insertado en una barra de cobre de alta pureza mediante una soldadura de unión. La barra está recubierta con una aleación de plomo antimonio, inyectada con tecnología injected coating (IC), obteniendo una superficie de alta resistencia a la corrosión de la barra y soldadura, aumentando significativamente la vida útil del ánodo. En la fabricación de los ánodos sobre la base de Pb-Ca-Sn se requiere que estos se encuentren en la proporción de 0,070% Ca, 1,5% Sn y 98,43% Pb [15].

Las dimensiones de los ánodos varían según la solicitud de cada proyecto, pero poseen medidas que fluctúan alrededor de 1 metro de largo y ancho y 6 mm de espesor [9].

Durante la etapa de operación, los ánodos son inspeccionados visualmente, al tacto o con diferentes equipos con el objetivo de predecir su comportamiento. Las variables que se estudian más cuidadosamente son:

1. Corrosión en la plancha: Revela una alta densidad de corriente.
2. Daños en la barra de Cobre: Podría presentar estados defectuosos como torcida, golpeada o corroída.
3. Estado de la soldadura: Entrega información respecto a la eficiencia eléctrica del ánodo. Para ello se busca soldadura fracturada en niveles grave o leve.
4. Presencia de la capa de PbO_2 : Se puede evaluar bajo los criterios de escamosa grave, escamosa leve y fina. Debe ser lo más estable posible para no contaminar los cátodos.

5. Temperatura: Una brusca subida de la temperatura de la barra indica la presencia de cortocircuitos.
6. Amperaje: El objetivo de esta medición es obtener la densidad de corriente en que se encuentra operando el ánodo.

3.2.3. Cátodo

Actualmente, la mayoría de las plantas de EW utilizan cátodos laminados reutilizables de acero inoxidable 316L con dimensiones alrededor de 1 por 1 metro de largo y ancho y 3 mm de espesor. Estos además utilizan un marco en los bordes laterales para evitar que se coseche cobre en los cantos de los cátodos, este generalmente está fabricado de materiales como polipropileno o PVC que no reaccionan al medio ácido.

La utilización de ánodos Pb-Sn-Ca favorece a maximizar la pureza de los cátodos a lo largo de su vida útil, aunque muchas veces se pueden encontrar niveles de impureza en el orden de $Pb < 3 \text{ ppm}$ y $S < 4 \text{ ppm}$ [9], entre otros dependiendo de cada operación. Otros factores que maximizan la pureza del cátodo, que afecta directamente a la pureza del cobre cosechado son la limpieza inmediata y exhaustiva del cátodo cosechado con agua a 70 u 80°C, la remoción frecuente de las borras anódicas del fondo de la celda, la incorporación de aditivos al electrolito que favorezcan la deposición y eviten la corrosión de los ánodos de plomo.

3.3. Composición del electrolito

Según lo estudiado en la ley de Nernst, las actividades ocurridas en la inmediatas de ánodo y cátodo dependen directamente de la composición del electrolito y, por lo tanto, afectan al potencial requerido para llevar a cabo la electrolisis que, a su vez, influyen en propiedades como la densidad de corriente y la conductividad, que afectan la transferencia de masa y consumo energético. Las concentraciones que poseen mejores resultados en el equilibrio de las relaciones fisicoquímicas del electrolito corresponden a 35 a 45 gramos de cobre por litro de electrolito y de 160 a 180 gramos de ácido sulfúrico por litro de electrolito [16]. Además, se agrega un agente suavizante, comúnmente goma guar en concentraciones aproximadas de 250 gramos por tonelada de cobre cosechado [9]. Este ayuda a generar depósitos de cobre densos y uniformes, con un arrastre mínimo de impurezas.

Uno de los aditivos comúnmente utilizados para mejorar la productividad del proceso corresponde al sulfato de cobalto, este proporciona alrededor de 150 ppm de iones de cobalto (Co^{2+}), al electrolito. El Co^{2+} tiene la capacidad de elevar la producción de O_2 en la superficie del ánodo (reacción 3.2) por sobre la oxidación de plomo en dicho electrodo. Además, ayuda a reducir la contaminación por plomo de la deposición y la celda y extender la vida del ánodo [9].

Otro aditivo común corresponde a iones de cloruro, el cual puede estar naturalmente presente en el electrolito o adicionarse como cloruro de hidrógeno (HCl). Este promueve deposiciones de cobre más densas y con un tamaño de grano más fino, así como también baja cantidad de impurezas. En cátodos de acero inoxidable, las concentraciones de iones de cloruro deben estar por debajo de 30 ppm. Una mayor concentración puede suscitar la evolución del gas de cloro formando Cl_2 , causando corrosión en la hoja de acero, que a su vez provoca

deposiciones más adosadas a la superficie y por lo tanto con mayor resistencia a desprenderse [9].

A nivel industrial, el electrolito se compone por una fracción mayoritaria de electrolito rico, proveniente de las naves de LX-SX y una fracción minoritaria de electrolito pobre saliente, recirculado desde el proceso mismo de EW.

3.4. Densidad de corriente

Las operaciones convencionales de electroobtención normalmente operan a densidades de corriente en el cátodo en un rango de 220 a 380 A/m². Y más típicamente en el rango de 300 a 350 A/m² [17]. Con estos valores se obtienen tasas de deposición del orden de 0,25 a 0,5 kg de cobre por hora en cada cátodo [9].

La densidad de corriente es sumamente importante para mejorar la tasa de producción del proceso. La tasa de deposición de metal es función de la densidad de corriente, por tanto, influye en la morfología del cobre depositado. Para lograr una alta tasa de deposición, se requiere una mayor densidad de corriente que asegure un rápido recubrimiento de cobre. Sin embargo, a densidades demasiado altas se obtienen morfologías deformes y consumo energético elevado, ya que, según lo establecido por la Ley de Faraday, la velocidad a la que puede pasar la corriente continua a través de la celda está limitada por la velocidad a la que los iones de cobre pueden pasar desde la solución electrolítica a la superficie del cátodo.

3.5. Otros parámetros operacionales

Existen otros parámetros operacionales sumamente importantes para mantener la productividad y eficiencia del proceso. Y que, para ello, deben oscilar en rangos de operación limitados, al igual que los parámetros anteriormente mencionados.

3.5.1. Temperatura

La temperatura tiene importantes efectos en las propiedades fisicoquímicas del electrolito. Un aumento de temperatura mejora la conductividad, la transferencia de masa y la distribución de corriente, así como la eficiencia de la corriente. Esto tiene un efecto positivo sobre la morfología del depósito y el consumo energético. Sin embargo, una vez alcanzados ciertos límites, el aumento de la temperatura puede generar rugosidad de la superficie del cátodo, como también puede resultar en un mayor consumo de energía y entornos de trabajo desfavorables para los operadores. Los valores óptimos para la temperatura del electrolito oscilan entre los 32 y 60 °C [18].

3.5.2. Régimen de flujo

El caudal del electrolito es otro parámetro crítico por considerar al analizar el proceso EW. Los iones de cobre se transportan a la superficie del cátodo a través de difusión, migración y convección. El modo de transporte por convección depende en gran medida del caudal del fluido. El caudal de electrolito aumenta la eficiencia de la corriente y se reduce la energía requerida. Por el contrario, la disminución del caudal puede ralentizar la convección y la difusión de iones a la superficie del cátodo y, en consecuencia, reducir la velocidad de deposición. Sin embargo, altos caudales pueden causar una fuerte agitación de los depósitos que pueden separarse y causar cortocircuitos entre el ánodo y el cátodo.

El electrolito fluye constantemente desde un estanque de almacenamiento hacia las celdas a través de un sistema colector ubicado en la parte inferior de la celda (ver figura 3.3) con caudales que poseen valores entre 4 y 30 m³/h por metro cuadrado de cátodo activo [17]. Además, el movimiento de la solución electrolítica puede aumentarse mediante agitación para mejorar la transferencia de masa.

3.6. Consideraciones energéticas (eficiencia de corriente)

La mayor parte de la energía consumida está relacionada con la energía eléctrica necesaria para impulsar las reacciones electroquímicas fundamentales (reacciones 3.1 y 3.2). Para la electroobtención industrial de cobre, la mediana del consumo específico de electricidad es de 2 kWh/kg_{Cu} [18]. Este valor representa alrededor del 80% de la energía total consumida por el proceso. El consumo de energía restante se emplea, en primera instancia en ejecutar procesos externos necesarios para poder llevar a cabo la electroobtención. Algunos de estos son: el consumo producido por todos los equipos necesarios para recolectar el metal desde los cátodos una vez finalizada la electrolisis, bombear solución hacia la celda, generar energía térmica para calentar el electrolito, poner en funcionamiento ventiladores de enfriamiento, entre otros necesarios para cada proyecto en particular.

Por otro lado, se debe considerar que, aunque la Ley de Faraday establece que la cantidad de sustancia liberada en los cátodos es directamente proporcional a la cantidad de electricidad que traspasa la solución, ocurre que una parte de esta corriente no se emplea en la deposición del metal. Con el objetivo de monitorear dicha diferencia es que se define el rendimiento o eficiencia de la corriente como la relación entre la cantidad de metal depositado en el cátodo y la cantidad de metal teóricamente calculado en dicha Ley. La eficiencia de corriente se calcula como:

$$CE\% = \frac{m_{\text{real}}}{m_{\text{th}}} \times 100 \quad (3.4)$$

Donde m_{real} corresponde a la masa real cosechada en un cátodo y se obtiene pesándolo una vez cosechado y enfriado. La masa teórica de cobre (m_{th}) que se debiese depositar por Ley de Faraday se define como:

$$m_{\text{th}} = \frac{I \times N \times t \times PM}{n \times F} \quad (3.5)$$

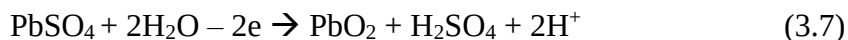
Donde m_{th} corresponde a la masa teórica en kg, I corresponde a la corriente en kA, N es el número de celdas en la instalación, t es el tiempo que dura el proceso medido en segundos, PM el peso atómico del cobre en kg/mol, n es el número de electrones utilizado para reducir el ion de cobre al sólido y F corresponde a la constante de Faraday (96,485 C/mol de electrón).

La eficiencia de corriente es el principal instrumento utilizado para determinar la productividad de un proyecto de electroobtención, su importancia radica en que proporcional a ella se logra maximizar la tasa de recubrimiento de cobre y minimizar el consumo de energía eléctrica. En procesos de alta eficiencia su valor oscila entre 92 a 94% [18].

Las principales causas que pueden provocar una disminución en el rendimiento de la corriente son: cortocircuitos entre ánodo y cátodo, pérdidas de corriente a tierra y reducción de hierro en el cátodo o reoxidación en el ánodo.

3.7. Borrás anódicas

Además de la reacción 3.2, en la superficie del ánodo se llevan a cabo otras reacciones de oxidación:



En ánodos nuevos la reacción 3.6 es la primera en ocurrir y tiene como resultado el recubrimiento del ánodo con una capa no conductora de sulfato de plomo II (PbSO_4). Posteriormente, tiene lugar la reacción 3.7, en donde el sulfato de plomo II evoluciona a óxido de plomo II (PbO_2), que es un excelente conductor. Es en esta capa donde se lleva a cabo la reacción de oxidación del O_2 (reacción 3.2). Un 0,67% de la electricidad consumida en el proceso EW es utilizada para la formación de PbO_2 [19].

La borra anódica es un desecho generado en el proceso de electroobtención de Cu. Cuyo mecanismo de producción consiste principalmente en el desprendimiento de la capa protectora del ánodo al momento de deselectrificar el circuito para la cosecha de los cátodos de cobre. Esto produce que una parte del recubrimiento de óxido de plomo pierda su adherencia y precipite. Además, en consecuencia a esto, al momento de utilizar nuevamente el ánodo para un nuevo proceso de EW se genera una nueva capa protectora, con la consecuente disminución gradual en el espesor de los ánodos a través del tiempo.

La composición de la borra anódica depende en gran medida de la composición del electrolito, ya que, en el proceso LX se disuelven otros minerales desde la roca además del cobre, aunque el proceso SX produce un electrolito más limpio, siempre es posible encontrar otros minerales. En la tabla 3.1 se encuentran los resultados obtenidos por un estudio que analiza valores promedio para algunos parámetros operacionales y minerales presentes en el electrolito para operaciones que generan una alta y una baja producción de borra anódica [20].

Tabla 3.1 Composición del electrolito en plantas EW en Chile

Parámetro	Alta producción de borra	Baja producción de borra
kg Pb / año / celda	456,0	78,0
Flujo [m^3/h]	25,1	15,3
Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	49,8	45,3
Cu [g/l]	42,5	41,2
Cl^- [mg/l]	17,3	22,0
Co^{2+} [mg/l]	125,8	127,2
Fe^{2+} [mg/l]	562,1	69,0
Mn^{2+} [mg/l]	26,4	7,0

Dado que las concentraciones de hierro y manganeso en el electrolito presentan una diferencia significativa entre altos y bajos productores, se puede inferir que el efecto combinado de estas impurezas es la base para mejorar el control de la producción de borra. Además, la variabilidad de la tasa de formación de borra no solo está estrechamente relacionada con la composición del electrolito, sino también con el control adecuado de los parámetros operativos de la planta como cortocircuitos, temperatura del electrolito y calidad del ánodo.

Por otro lado, el mismo estudio establece la composición típica de la borra en la industria chilena, resultados en la tabla 3.2. Cabe recordar que, el cobre puede ser encontrado en la naturaleza en mixtura con otros minerales (óxidos o sulfuros) dependiendo de la zona.

Tabla 3.2 Composición de la borra anódica típica en la industria chilena

Componente	Porcentaje %
Pb	76,6
Cu	1,2
Fe	0,3
Mn	0,2
Otras impurezas	1,2

Se observa que el componente principal es el plomo, en forma de sulfato, que se produce por la corrosión del ánodo. El cobre en la borra se origina en las operaciones de control del cátodo. El hierro presente se debe al atrapamiento mecánico del electrolito durante la eliminación de la borra de la celda.

En promedio, las plantas de EW en Chile producen alrededor de 2 kton/año de plomo sólido en forma de borra. La tasa promedio de generación de borra en las plantas chilenas es de aproximadamente 0,2 kg Pb/ánodo/día [20].

3.8. Control de niebla ácida

Otro de los aspectos a controlar es la niebla ácida, la cual es producto de las reacciones que ocurren entre el ánodo y el electrolito, las moléculas de agua se electrolizan y se forman burbujas de oxígeno en la superficie del ánodo. Estas burbujas crecen, se desprenden de la superficie y se elevan estallando en la superficie libre de la solución y produciendo gotas muy ácidas. Las partículas más finas se transportan por el aire y forman una neblina ácida en todo el depósito de la nave.

La neblina ácida es altamente corrosiva, afectando las placas del cátodo, la barra de suspensión del ánodo y el equipo y las estructuras de las naves. También representa un grave peligro para la salud y causa malestar extremo en piel, ojos y el sistema respiratorio de los trabajadores de la nave [2].

Los parámetros que más influyen en la cantidad de niebla generada son la temperatura y la presencia de algún reactivo químico para inhibir la generación de esta. Más del 90% de las variaciones en la generación de niebla ácida se pueden explicar por cambios en estos parámetros y en su interacción [21]. En menor medida, la densidad de corriente y la acidez de la solución también afectan la cantidad total de niebla ácida generada.

En general, la niebla ácida aumenta con la temperatura y la densidad de corriente. En contraste, la adición de reactivos a la solución disminuye la cantidad de niebla ácida, esto gracias a su capacidad para aumentar la elasticidad y la viscosidad de la superficie.

Como medidas para mitigar las consecuencias de niebla ácida se utilizan esferas de polietileno de diámetro estándar de 20 mm flotando en la superficie de la celda en una capa de 5 a 10 cm de espesor [9]. Esto tiene el objetivo de impedir la liberación de la mayor cantidad de niebla al momento de reventar el O_2 en la superficie. Además, se instalan grandes extractores para asegurar la entrada, flujo y distribución adecuada de aire a las instalaciones.

3.9. Recopilación de parámetros clave

A continuación se enlista un resumen de los parámetros operacionales descritos anteriormente con sus respectivos valores óptimos de operación.

Tabla 3.3 Parámetros operacionales clave para la operación

Parámetro	Valor de operación
Ánodo	Aleación Pb-Ca-Sn
Cátodo	Acero inoxidable 316L
Concentración Cu	35 – 45 g/l
Concentración H_2SO_4	160 – 180 g/l
Densidad de corriente	300 – 350 A/m^2
Temperatura	35 – 60 °C
Régimen de flujo	4 – 30 m ³ /h

Dada la complejidad del proceso EW para el diseño de una planta piloto escala semi-industrial, se requiere aplicar una metodología de diseño que permita definir los componentes más adecuados para mantener, principalmente, la seguridad en la operación y garantizar que se cumplan los parámetros para simular el proceso a escala industrial.

4. Metodología de diseño

En el marco del proyecto FONDEF-IdeaA ID17I20012 “Desarrollo de electrodos de alta eficiencia en base a materiales nanoestructurados para aplicaciones en procesos de electroobtención en la minería” se debe diseñar un banco de pruebas para electroobtención de cobre a escala semiindustrial, es decir para trabajar con electrodos con dimensiones de 50 x 50 cm². Para llevar a cabo el trabajo solicitado se utilizará la metodología de Morris Arimow, llamada morfología de diseño. Esta da una descripción detallada de los pasos sistemáticos que se deben seguir para lograr un diseño óptimo. [22]

La figura 4.1 muestra las diversas actividades que componen las tres fases de la morfología de diseño: diseño conceptual, diseño de realización y diseño de detalle. Este conjunto de ocho pasos corresponde a una representación del proceso de diseño básico cuyo propósito es entregar la secuencia lógica de actividades que conduce desde la definición del problema hasta el diseño detallado.

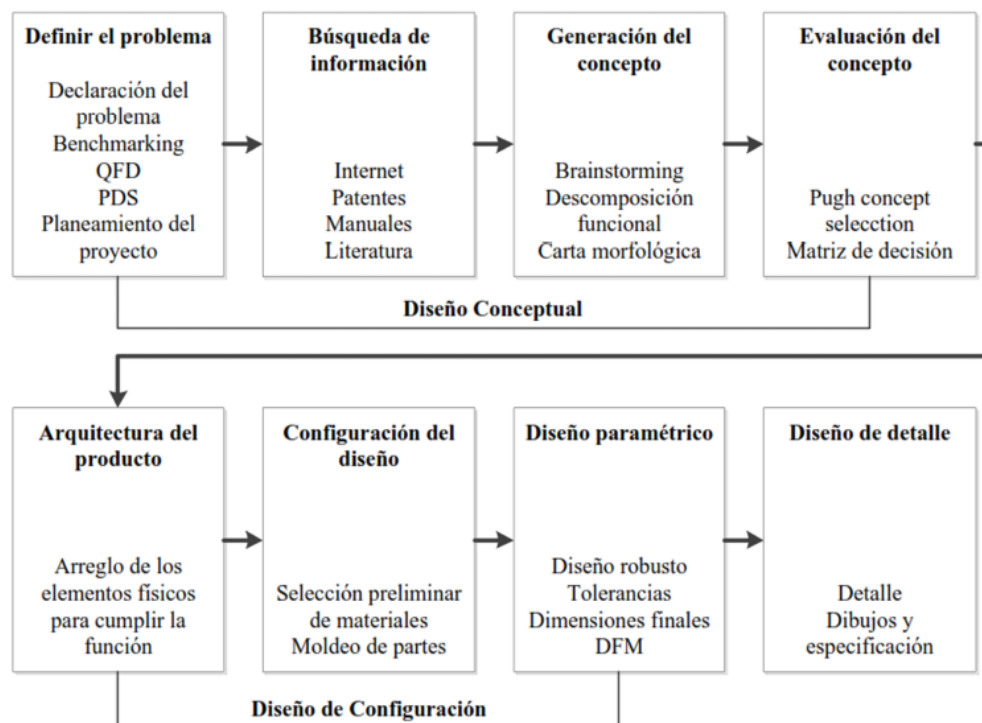


Figura 4.1 Morfología de diseño [22].

4.1. Fase 1: Diseño conceptual

El diseño conceptual es el proceso mediante el cual se inicia el diseño. La primera etapa del diseño conceptual consiste en definir el problema, identificando las necesidades del cliente con el objetivo de comprender completamente las necesidades a satisfacer con el diseño con el fin de generar una serie de posibles soluciones. La finalidad de esta etapa es seleccionar un único concepto que satisfaga dichas necesidades de la manera más óptima posible. Para ello se debe pasar por diferentes tareas en donde se debe detallar los requisitos del producto,

recopilar información de ingeniería, conceptualización, selección de conceptos de diseño, entre otros.

4.2. Fase 2: Diseño de configuración

En esta fase del diseño es donde ocurre el desarrollo estructural del concepto seleccionado, se lleva a cabo la materialización de todas las funciones principales que debe realizar el producto y se toman decisiones sobre la resistencia, la selección de materiales, el tamaño, la forma y la compatibilidad espacial [22].

El diseño de configuración posee tres tareas principales: la arquitectura del producto, que se ocupa de dividir el sistema en subsistema o módulos y definir como se organizarán los componentes físicos para llevar a cabo las tareas funcionales del diseño; el diseño de configuración de piezas y componentes, consiste en señalar la disposición espacial de las distintas partes para que el conjunto sea funcional, se entrega más especificación sobre materiales y fabricación y es posible generar modelos físicos de las piezas con modelos rápidos de prototipado; por último el diseño paramétrico, donde, con la información del punto anterior, se establecen dimensiones exactas y tolerancias de diseño [22].

El primero de estos pasos, la arquitectura del producto corresponde al esquema mediante el cual las funciones del producto se agrupan en partes físicas con una configuración establecida. La elaboración de la arquitectura es esencial para el desarrollo del producto al llevar a cabo la transformación de una descripción funcional a una descripción física del producto. La arquitectura puede ser modular o integral. En el primero de estos, el sistema se divide en módulos, donde cada uno realiza una o unas pocas funciones generales mediante la combinación de distintos equipos, partes o piezas. Además, se pueden definir claramente las interacciones entre cada uno de los módulos. Por otro lado, en la arquitectura integral las funciones se asignan a un pequeño número de elementos físicos, por lo que cada módulo puede realizar múltiples funciones. Esto permite reducir el número de componentes, pero aumenta la complejidad de cada uno de ellos.

4.3. Fase 3: Diseño detallado

En esta fase, el diseño se lleva a la etapa de una descripción de ingeniería completa de un producto probado y producible. Se agrega la información faltante sobre la disposición, la forma, las dimensiones, las tolerancias, las propiedades de la superficie, los materiales y los procesos de fabricación de cada pieza. Se deben completar actividades como el desarrollo de planos detallados de ingeniería para la manufactura, realización de pruebas de verificación analizando los parámetros críticos, realización de planos e instrucciones de ensamblaje, actualización del listado de materiales. Esta etapa concluye con una revisión antes de la decisión de construir el producto.

5. Diseño conceptual de la planta piloto EW escala semiindustrial

El diseño conceptual corresponde a la primera etapa del proceso de diseño. En esta se plantea el problema a resolver. A partir de las necesidades y requerimientos del cliente, se busca la información necesaria, se determina las posibles soluciones y se seleccionan aquellos conceptos óptimos y viables para dichas necesidades.

Las actividades que se deben realizar para un correcto diseño de conceptos inician con la definición del problema, identificación de las necesidades del cliente, búsqueda de información (datos, documentos y antecedentes que permitan generar soluciones), conceptualización (generación de alternativas de solución) y selección de conceptos (evaluación de los conceptos generados y selección del más adecuado para su desarrollo) para hacer una redefinición de las especificaciones y revisión del diseño posterior a esta selección. En las subsecciones siguientes se desarrolla la primera etapa de la metodología aplicado al diseño de la celda de electroobtención.

5.1. Definición del problema

El proyecto tiene como finalidad estudiar la eficiencia de ánodos fabricados a partir de nanomateriales en combinación con materiales poliméricos, para ello se debe diseñar e implementar un banco de pruebas a escala semiindustrial que permita evaluar la eficiencia de los ánodos simulando las condiciones operacionales de una planta industrial de EW.

Para ello se requiere de una celda electrolítica para trabajar con 180 litros de electrolito a 43 °C. Además, se debe contar con una bomba de bajo caudal para ácido sulfúrico que permita la recirculación entre la celda y el reservorio a razón de 92 l/min, de esta manera se mantienen los parámetros hidrodinámicos de una planta industrial de electroobtención.

La celda debe estar dimensionada para maniobrar de manera óptima electrodos de 50x50 cm^2 . También se debe contar con un sistema de montaje y desmontaje de estos; y un sistema de control de niebla ácida que permita mantener la seguridad de los operarios y las instalaciones. Finalmente, se debe diseñar un sistema de monitoreo de parámetros operacionales como temperatura, corriente y voltaje. Y se debe implementar un sistema de vigilancia remota de todos los equipos y el proceso general.

5.1.1. Lista de atributos

A partir de la definición del problema se identifica una serie de atributos esperados por el cliente para el producto final. Estos se han establecido en conjunto con la empresa Inpammet, quienes han entregado información relevante para el diseño, y con la dirección de infraestructura de la UTFSM, quienes han establecido algunos criterios generales y normativas que se deben cumplir para la instalación de la planta.

Los atributos de diseño se agrupan según su naturaleza en: objetivos, los cuales son atributos deseados para el diseño; restricciones, correspondientes a límites que el diseño debe cumplir y funciones, que son las acciones que el diseño debe realizar.

A su vez los objetivos se agrupan por características similares. En esta oportunidad se identifican 3 subcategorías: rendimiento, funcionalidad y seguridad. El resumen de los atributos en sus respectivas categorías y subcategorías se aprecia en la tabla 5.1.

Tabla 5.1 Atributos de diseño

FUNCIONES	RESTRICCIONES	OBJETIVOS		
		Rendimiento	Funcionalidad	Seguridad
Electro-obtener cátodos de cobre	Suministro de voltaje: 1,6 V	Funcionamiento continuo sin interrupciones de corriente	Diseño libre de fugas	Control de niebla ácida
Recircular electrolito	Flujo a 92 l/s	El nivel de electrolito se mantiene sin ocasionar derrames	Fácil montaje y desmontaje de los electrodos	
Controlar niebla ácida	Tasa de producción + 10%	Facilidad en el recambio del electrolito	Diseño modular	Resistente a la corrosión y oxidación por ácido sulfúrico
Monitorear la temperatura	Espacio disponible: L x W = 300 x 298			
Monitorear voltaje a la entrada	cm ² , H = 295 cm. (considerando un largo máximo aprox. y el ancho total del laboratorio).	Baja frecuencia de mantenimiento	Fácil de limpiar	Salida de gases a los cuatro vientos
Monitorear corriente a la salida		Costos de mantenimiento		
Vigilar el proceso de forma remota	Operación continua 5 días mínimo	bajos	Diseño compacto	Partes eléctricas protegidas
Montar y desmontar electrodos	Diseño de cuba para cátodos de 50 x 50 cm ²	Vigilancia remota	Transportable	

Los objetivos de diseño en la tabla 5.1 están enlistados en orden por su nivel de importancia según el criterio de apreciación de la diseñadora.

5.1.2. Lista de objetivos argumentada

Con el objetivo de entender de mejor manera como se relacionan entre ellos los atributos enlistados anteriormente, en la tabla 5.2 se añaden las funciones y restricciones en una de las categorías de rendimiento, funcionalidad o seguridad.

Tabla 5.2 Lista de objetivos argumentada

1. Rendimiento	2. Seguridad	3. Funcionalidad
1.1 Funcionamiento continuo sin interrupciones de corriente	2.1 Control de niebla ácida	3.1 Diseño libre de fugas
1.2 El nivel de electrolito se mantiene sin ocasionar derrames	2.2 Resistente a la corrosión y oxidación por ácido sulfúrico	3.2 Fácil montaje y desmontaje de los electrodos
1.3 Facilidad de recambio del electrolito	2.3 Salida de gases a los cuatro vientos	3.3 Diseño modular
	2.4 Partes eléctricas protegidas	3.4 Fácil de limpiar
	F.2.1 Controlar niebla	3.5 Diseño compacto
		3.6 Transportable
		F.3.1 Electroobtener

1.4 Baja frecuencia de mantenimiento	ácida	cátodos de cobre
1.5 Costos de mantenimiento bajos	F.2.2 Monitorear la temperatura del electrolito	F.3.2 Recircular electrolito
1.6 Vigilancia remota	F.2.3 Vigilar el proceso de forma remota	F.3.3 Monitorear corriente a la salida
F.1.1 Monitorear voltaje de entrada		F.3.4 Montar y desmontar electrodos
R.1.1 Flujo a 92 l/s		R.3.1 Operación continua 5 días máximo
R.1.2 Tasa de producción + 10%		R.3.2 Diseño de cuba para cátodos de 50 x 50 cm ²
R.1.3 Espacio máximo ocupado 120x80x150 cm (LxWxH)		

5.1.3. Lista de objetivos con pesos ponderados

Como se mencionó en el inciso 5.1.1, la jerarquización de los objetivos se realiza únicamente bajo el criterio del equipo de diseño. Con el objetivo de generar un ordenamiento en base a una metodología que permita facilitar la toma de decisiones en base a argumentos sólidos, se utiliza la escala relativa de importancia modificada. En esta se calculan los pesos relativos por cada categoría de objetivos y los pesos de cada objetivo en particular dentro de su categoría, con el objetivo de jerarquizar la importancia por categoría y por objetivo.

En la tabla 5.3 se pueden observar los resultados de la jerarquización. El peso de cada categoría u objetivo se encuentra a su lado entre paréntesis. Los detalles de cálculo se pueden encontrar en el anexo A.

Tabla 5.3 Lista de objetivos con pesos ponderados

1. Rendimiento (0,58)	2. Seguridad (0,31)	3. Funcionalidad (0,11)
1.1 El nivel de electrolito se mantiene sin ocasionar derrames (0,181)	2.1 Control de niebla ácida (0,125)	3.1 Diseño libre de fugas (0,036)
1.2 Funcionamiento continuo sin interrupciones de corriente (0,166)	2.2 Salida de gases a los cuatro vientos (0,090)	3.2 Fácil montaje y desmontaje de los electrodos (0,030)
1.3 Facilidad de recambio del electrolito (0,105)	2.3 Resistente a la corrosión y oxidación por ácido sulfúrico (0,067)	3.3 Diseño modular (0,017)
1.4 Baja frecuencia de mantenimiento (0,061)	2.4 Partes eléctricas protegidas (0,028)	3.4 Fácil de limpiar (0,014)
1.5 Costos de mantenimiento bajos (0,036)		3.5 Diseño compacto (0,011)
1.6 Vigilancia remota (0,027)		3.6 Transportable (0,004)

5.2. Análisis funcional

La siguiente etapa del diseño conceptual inicia con la determinación de las funciones que debe cumplir el diseño para poder lograr los objetivos establecidos por el cliente. Esto se realiza, en primer lugar, en base a todos los materiales, señales y fuentes de energía que entran y salen del sistema, todos los procesos necesarios para transformar dichas entradas en las salidas se establecen como subfunciones.

5.2.1. Modelo de caja negra

El modelo de caja negra tiene como función representar la interacción del sistema a diseñar con el medio que lo rodea. Se identifica la electroobtención de cobre como la función principal para el estudio. Además, se introducen las entradas necesarias para el desarrollo de dicha función y las salidas del sistema, correspondientes al resultado esperado luego de realizarla. En la figura 5.1 se ilustra el modelo aplicado a este proyecto.

Dentro de las entradas, se idéntica la electricidad como suministro energético; electrolito, cátodos y ánodos corresponden a los materiales necesarios para la electroobtención. Las señales que deben ser medidas a la entrada del proceso son temperatura, flujo o caudal y voltaje.

Como materiales de salida se encuentran el electrolito pobre, ánodos, cobre cosechado y vapores ácidos, los que de igual forma deben ser gestionados dentro de los requerimientos del cliente. Como consecuencia de la energía de entrada se presentan calor y ruido a la salida. Por último, la única señal que debe ser medida a la salida es la corriente.

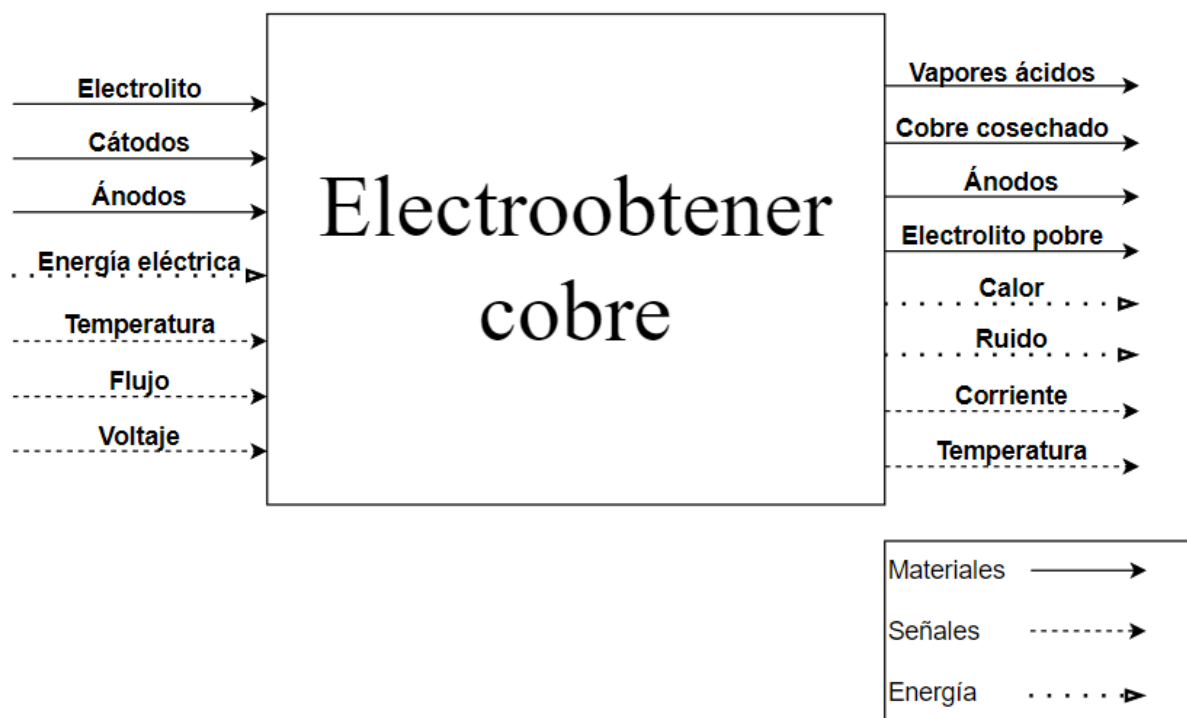


Figura 5.1 Modelo de caja negra.

5.2.2. Modelo de caja transparente

Por otro lado, el modelo de caja transparente (figura 5.2) además de incluir las mismas entradas y salidas, integra las subfunciones necesarias para la transformación de los materiales, energía y señales. Esto permite establecer las relaciones necesarias entre las subfunciones y los productos de entrada y salida.

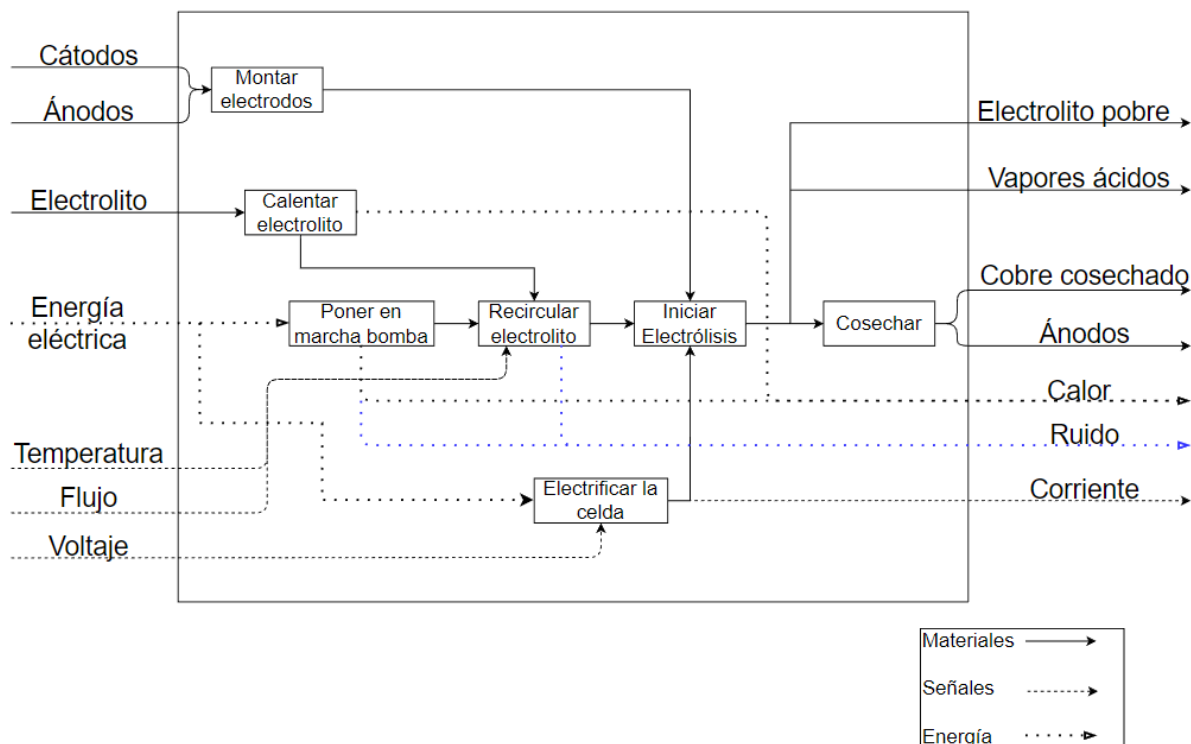


Figura 5.2 Modelo de caja transparente.

5.2.3. Benchmarking

El benchmarking es una herramienta de evaluación cuyo objetivo es comparar el equipo que se busca diseñar con otros ya existentes en el mercado, similares o que cumplan la misma función. Esta herramienta permite identificar parámetros para las especificaciones de diseño y encontrar soluciones ya existentes para las funciones a realizar por el producto a diseñar.

Para poder tener una mirada más amplia de las posibles soluciones para este diseño, se tomarán en consideración tanto la electroobtención convencional, como tecnologías de innovación y bancos de prueba.

Minera El Abra

Minera El Abra, filial de Freeport-McMoRan (FCX), es una faena minera de cobre a rajo abierto ubicada a 75.6 kilómetros al noreste de la ciudad de Calama, en la Región de Antofagasta. Su principal actividad es la producción de cátodos de cobre, el año 2020 produjo 71,9 toneladas de cobre en forma de cátodos electroobtenidos.

A nivel operacional, la minera posee celdas con dimensiones de $6,57 \times 1,30 \times 1,40 \text{ m}^3$ (L x w x H) fabricadas de hormigón polimérico y con una capacidad de 67 ánodos y 66 cátodos. Los electrodos poseen dimensiones de $1074 \times 940 \times 6 \text{ mm}^3$ (L x w x t) y se requiere de 5 días en

operación para la cosecha. El electrolito utilizado posee concentraciones de 195 g/l de ácido sulfúrico y menores a 34 g/l de cobre. Este es bombeado al proceso a 0,32 m³/min por una bomba centrífuga horizontal con temperaturas entre 40 y 43 °C.

El voltaje necesario para que se produzca la electrólisis es de 2 V, con una corriente por celda de 32 a 40 kA, una eficiencia de corriente de 255 a 315 A/m² y una eficiencia de corriente de 92%.

EWTech – Led

La planta EWTECH (figura 5.3) corresponde a un proyecto innovador perteneciente a la empresa Proter que tiene como objetivo la fabricación de un proceso modular de electroobtención de cátodos de alta calidad y a un precio competitivo para la mediana y pequeña industria. Esta tecnológica cambia la configuración de las celdas en paralelo a un sistema en serie, alcanzando una alta eficiencia y baja corriente en los rectificadores.

Después de las etapas de pruebas en laboratorio, el año 2018 se instaló la planta de pilotaje industrial en la minera Diamantina, Región de Coquimbo. Esta posee seis módulos de EW con 10 celdas cada uno. Cada celda posee solo un ánodo y un cátodo (por la corriente en serie) y son alimentadas a razón de 0,9 a 1,5 m³/min con electrolito con concentraciones de 150 a 200 g/l de ácido sulfúrico y 40 a 48 g/l de cobre con temperaturas entre los 40 y 48°C.

El voltaje utilizado para la electrolisis en este proceso es de 1,8 a 2 V, con una corriente de 0,5 kA, una eficiencia de corriente de 300 a 700 A/m² y una eficiencia de corriente mayor a 98%.



Figura 5.3 Planta de pilotaje industrial EWtech [23].

5.2.4. Especificaciones de diseño

Las especificaciones o requerimientos de diseño corresponden a los parámetros de diseño con los que debe cumplir el producto, tanto para satisfacer la demanda del cliente, como para realizar la o las funciones principales. La tabla 5.4 enlista dichas especificaciones, en la primera columna se señala si es un requerimiento obligatorio (O) o deseado (W) en el diseño.

Tabla 5.4 Especificaciones de diseño

Tabla 3.4 Especificaciones de diseño		
O / W	Especificación	
1. Geometría		
	Dimensiones celda (L x w x H)	700 x 600 x 650 mm ³
	Dimensiones banco de prueba (L x w x H)	2270 x 900 x 1600 mm ³
	Distancia fluido libre - techo	1,8 metros
	Volumen operacional	180 litros
	Volumen máximo celda	280 litros
	Volumen máximo reservorio	546 litros
	Diámetro de tubería de descarga	50 mm (2’')
2. Cinemática		
O	Velocidad de fluido	92 l/s
3. Energía		
O	Temperatura de operación	43 °C
	Temperatura máxima bomba	60 °C
	Temperatura máxima estanque	60 °C
	Suministro eléctrico celda	V
	Suministro eléctrico bomba	220/240V VAC, 50/60 Hz
	Tiempo en que alcanza la T° de trabajo	12 horas
	Pérdidas de calor en tuberías	
	Pérdida de carga en tuberías	
4. Material		
	Concentración ácido sulfúrico	140-180 g/l
	Concentración cobre	47 g/l
5. Seguridad		
	Sistema anti-rebalse	
	Velocidad de ventilación	
6. Fuerzas		
	Masa máxima de izaje	500 kg

	Potencia máxima de la bomba	3 kW
7. Operación		
	Cantidad máxima de electrodos en la celda	5

5.2.5. Matriz de requerimientos – objetivos

La siguiente etapa permite establecer una relación básica entre los objetivos de diseño y las especificaciones expuestas anteriormente. Con la finalidad de corroborar que los parámetros seleccionados sean coherentes con los requerimientos del cliente. Y, además, visualizar que los objetivos posean especificación o hitos que verifiquen su utilidad y permitan alcanzarlo.

Observando la matriz disponible en la tabla 5.5, se puede destacar que existen múltiples relaciones entre objetivos y requisitos de diseño. Aun así, se puede distinguir que la vigilancia remota posee interacción con una mayor cantidad de requisitos en comparación al resto de los objetivos, esto ya que la vigilancia tiene como finalidad supervisar el correcto funcionamiento del equipo y los parámetros operacionales. Por otro lado, el requisito que posee mayor cantidad de interacciones con los objetivos corresponde al sistema anti-rebalse, el cual, desde el punto de vista del equipo de diseño posee un valor más crítico, ya que es considerado fundamental para mantener la seguridad de los operarios y las instalaciones juzgando el fluido de trabajo en esta operación. Otros requisitos críticos para el equipo de diseño corresponden a las dimensiones del banco de prueba, debido al acotado espacio disponible en el laboratorio donde será montado y el suministro eléctrico de la bomba, ya que se debe mantener un trabajo continuo por varios días.

Tabla 5.5 Matriz de requerimientos – objetivos

Objetivos Requisitos	Funcionamiento continuo sin interrupciones de corriente	El nivel de electrolito se mantiene sin ocasionar derrames	Facilidad de recambio del electrolito	Baja frecuencia de mantenimiento	Costos de mantenimiento bajos	Vigilancia remota	Control de niebla ácida	Salida de gases a los cuatro vientos	Resistente a la corrosión y oxidación por ácido sulfúrico	Partes eléctricas protegidas	Diseño libre de fugas	Fácil montaje y desmontaje de los electrodos	Diseño modular	Fácil de limpiar	Diseño compacto	Transportable
LxWxH celda 700 x 600 x 650 mm3			•									•	•	•	•	
Dimensiones banco de prueba			•									•	•	•	•	•
Distancia fluido libre - techo			•									•	•	•	•	•
Volumen operacional de 180 litros		•	•			•	•				•		•		•	
Volumen máximo celda		•								•	•					
Volumen máximo reservorio		•				•					•		•		•	•
Diametro de tubería de descarga	•	•								•						
Velocidad de fluido 92 l/s	•	•														
Temperatura de operación 43°C				•	•	•	•			•						
Temperatura máxima bomba				•	•	•			•	•						
Temperatura máxima estanque 60°C				•	•	•			•							
Suministro eléctrico celda	•			•	•	•				•						
Suministro eléctrico bomba 220 V	•			•	•	•				•						
Tiempo en que alcanza la T° de trabajo	•					•										
Pérdidas de calor en tuberías						•							•		•	
Pérdida de carga en tuberías		•				•							•		•	
Concentración ácido sulfúrico 140 - 180 g/l						•	•	•	•	•						
Concentración cobre 47 g/l	•					•										
Sistema anti-rebalse		•	•			•			•	•	•			•		
velocidad de ventilación						•	•	•	•	•				•		
diametros de pelotitas de polietileno							•		•	•						
Masa máxima de izaje												•	•		•	•
Torque máximo de bomba	•			•	•	•										
Cantidad máxima de electrodos en la celda: 5	•					•					•	•		•		

5.3. Generación de conceptos

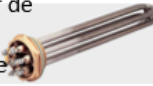
En esta etapa del diseño se procede con la elaboración preliminar del diseño del banco de pruebas, para ello se comienza con la búsqueda de soluciones que posean ciertas funciones que son requeridas para el diseño y se desarrollan las cartas morfológicas que se enfocan en las funciones demandadas y las alternativas de para cada una de ellas. Posteriormente, se procede a la generación de distintas alternativas que integren un conjunto de funciones que logren satisfacer las necesidades del diseño abarcando diferentes ideas resolutorias a las distintas funciones. El diseño de configuración termina con la selección del concepto óptimo para realizar las funciones establecidas por el cliente.

5.3.1. Carta morfológica

La carta morfológica corresponde a las alternativas que posee cada concepto con el objetivo de cumplir todas las funciones establecidas y ratificadas en los atributos de diseño y el

análisis funcional. En la tabla 5.6 se enlistan las diferentes alternativas para cada equipo necesario para cumplir las diferentes funciones.

Tabla 5.6 Carta morfológica

Función	Tipo de equipo	Conceptos			
Electroobtener cátodos de cobre	Celda	Hormigón polimérico 	Fibra de vidrio 		
	Estanque	Cilíndrico		Rectangular	
	Calefactor	Cinturón calefactor 	Calefactor de inmersión tipo flange 	Manta calefactora 	
	Terminal de conexión eléctrica	Banana 	Caimán 	Ojal 	
Recircular electrolito	Bomba	Bomba neumática de doble diafragma 	Bomba centrífuga de acople magnético o mecánico 	Bomba peristáltica 	
Controlar niebla ácida		Extractor	Esferas de poliestireno expandido	Esferas PP	
Montar y desmontar electrodos	Sistema de izaje	Grúa hidráulica 	Puente grúa 	Tecle manual o eléctrico 	
Monitorear la temperatura	Sensor de temperatura	Termómetro de vidrio 		Termocupla 	
Monitorear voltaje a la entrada		Multitester	Fuente de poder	Tensiómetro	
Monitorear corriente a la salida				Amperímetro	

5.3.2. Generación del concepto

A partir de las alternativas presentadas anteriormente y conociendo los antecedentes de operación, se generan diferentes distribuciones posibles para satisfacer las necesidades del cliente. Posteriormente se analizan para determinar cuál de los conceptos propuestos cumplen con los criterios de diseño.

Para el desarrollo de los conceptos a continuación expuestos es necesario considerar los elementos estructurales presentes en el laboratorio y el espacio disponible. Además, como se trabaja con un fluido que debe ser transportado a través de tuberías se realizarán análisis de pérdida de carga, cuyas memorias de cálculo pueden encontrarse en el Anexo A.

Concepto 1

La primera alternativa contempla una celda electrolítica de hormigón polimérico, ya que este es el que se utiliza en la industria minera, por lo tanto, ofrece una mayor semejanza a la EW convencional. Esta celda se ubicará en altura, sobre una mesa de trabajo, con el objetivo de generar una altura suficiente al agujero de salida para generar la recirculación hacia el estanque de almacenamiento por rebalse.

Para el estanque de almacenamiento se selecciona uno cilíndrico con capacidad de 500 litros, para almacenar una cantidad considerable de electrolito en relación con el volumen de trabajo, y para calefaccionar el fluido en su interior se utilizan cinturones calefactores, los cuales abrazan el estanque por fuera. La salida de flujo hacia la celda se encuentra en la parte inferior de este estanque y se selecciona una bomba peristáltica para transportar el fluido. Este tipo de bomba, aunque de mayor tamaño, es la más segura para este tipo de procesos, ya que el fluido solo tiene contacto con la manguera que lo transporta, por lo que además posee una menor y más barata mantención al requerir solo el cambio de dicha manguera.

Al ser un diseño con un ancho relativamente acotado, se selecciona una grúa hidráulica para el montaje y desmontaje de electrodos, esta puede ser almacenada fuera del laboratorio cuando no sea requerida. El suministro de energía eléctrica será a través de una fuente de poder de corriente continua y se realizarán constantes monitoreos de los parámetros de corriente y voltaje mediante un multítester. Debido al tamaño del estanque de almacenamiento, se selecciona una termocupla permanente para medir la temperatura dentro de este. Se selecciona un sensor de temperatura de vidrio para la medición del parámetro en la celda electrolítica.

Este concepto posee 550 centímetros de tuberías de llenado, es decir, aquellas necesarias para transportar el flujo desde el estanque hasta la celda (de color azul) y posee 124 centímetros de tuberías de rebalse (de color rojo), las necesarias para transportar el flujo desde la celda hacia el estanque. Además, se calcula una pérdida de carga en las tuberías de llenado de 1,126 metros (cálculos en el Anexo A), se debe considerar que la bomba debe elevar el fluido una altura de alrededor de 1,5 metros.

En la figura 5.4 se puede apreciar el espacio utilizado por este modelo. En este dimensionamiento el espacio libre entre la pared y el modelo también es considerado ya que el objetivo es dimensionar el espacio real del laboratorio ocupado por el banco.

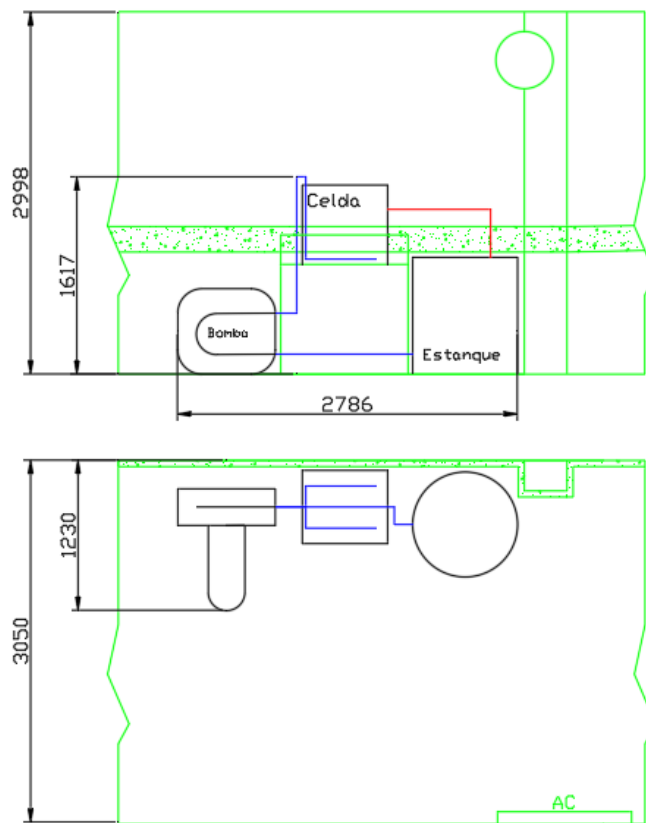


Figura 5.4 Concepto 1

Concepto 2

Para la segunda alternativa se contempla una celda electrolítica de fibra de vidrio, ya que es muy resistente al medio ácido, muy útil para este tipo de escala y además en mucho más accesible en precio y posibilidad de fabricación a medida que el hormigón polímero. Al igual que en el concepto anterior, la celda se ubica en altura para permitir el rebalse. Para el estanque se selecciona uno tipo IBC de 1000 litros y para calefaccionar el fluido se utiliza una manta calefactora, las cuales se comercializan en el mercado a medida para este tipo de estanque. La bomba seleccionada corresponde a una peristáltica y se ubica a un extremo del banco para poder succionar y descargar el fluido de manera más cómoda y efectiva de ambos estanques.

En este concepto, al igual que en anterior, el montaje de los electrodos es a través de un puente grúa transportable y modular. Por las dimensiones del estanque de almacenamiento, la medición de temperatura es a través de una termocupla sumergida permanentemente apta para el medio ácido; en cuanto a la medición de dicho parámetro en la celda electrolítica, se utiliza un termómetro tipo bulbo. El suministro de energía es a través de una fuente de poder de CC con rango de operación aptos para el proceso en esta escala y se utiliza un amperímetro de tenaza para verificar el valor de la corriente.

Este concepto posee 533 centímetros de tubería de llenado y 112 centímetros de tuberías de descarga. Además, posee 1,069 metros de pérdida de carga en las tuberías de llenado. Se

considera una altura de elevación del fluido de aproximadamente 1,5 metros. En la figura 5.5 se pueden observar las dimensiones generales de este concepto.

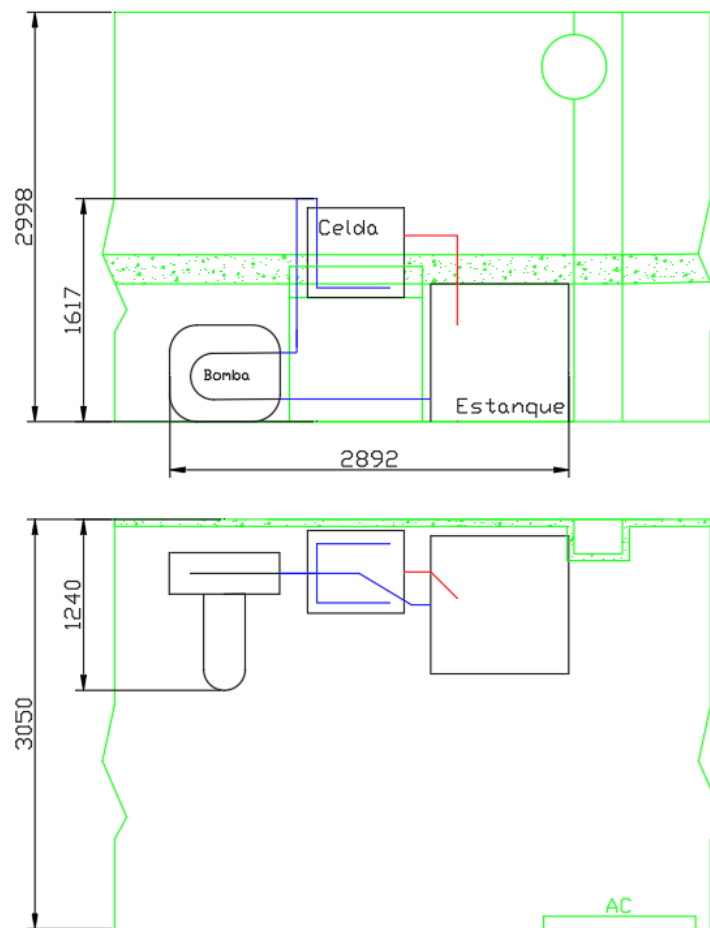


Figura 5.5 Concepto 2

Concepto 3

La tercera alternativa se basa en optimizar al máximo el espacio disponible, por lo que el estanque de almacenamiento se fabricará a medida de tal manera que el volumen se concentre en la dirección del largo del laboratorio, minimizando su ancho y altura. Esto permitirá también ubicarlo bajo la celda electrolítica, lo que además de minimizar el espacio utilizado, facilita el rebalse desde la celda al estanque, al utilizar menos cantidad de metros de tubería.

En este concepto ambos estanques serán fabricados a medida en fibra de vidrio, además se recomienda la utilización de resinas que entregan mayor seguridad operacional. El estanque de almacenamiento posee un volumen mayor que la celda electrolítica, para garantizar la utilización de electrolito rico en las diferentes pruebas. Además, al ser un estanque fabricado a medida, la única alternativa para calefaccionar corresponde a calefactores de inmersión. Al igual que en los conceptos anteriores, en este se baraja la utilización de una bomba peristáltica.

Debido a la geometría más accesible del estanque de almacenamiento, la medición del parámetro de temperatura se realiza a través de un sensor tipo bulbo, al igual que para la celda electrolítica. La corriente será suministrada por una fuente de poder de CC y se dispondrá de multitester y amperímetro de tenaza para verificar los valores de corriente y voltaje. Debido al mayor ancho que presenta este concepto, se selecciona un teclé manual para el izaje de los electrodos. Este teclé se sitúa en el techo por sobre la celda.

Este concepto, apreciable en la figura 5.6, posee 477 cm de tubería de llenado, bastante menor en consideración a los conceptos anteriores, esto se debe a que los equipos están más cerca unos de otros. Las tuberías de rebalse alcanzan los 95 cm y posee 0,960 m de pérdida de carga en la bomba. Al igual que en los conceptos anteriores se considera una altura de elevación cercana a 1,5 metros.

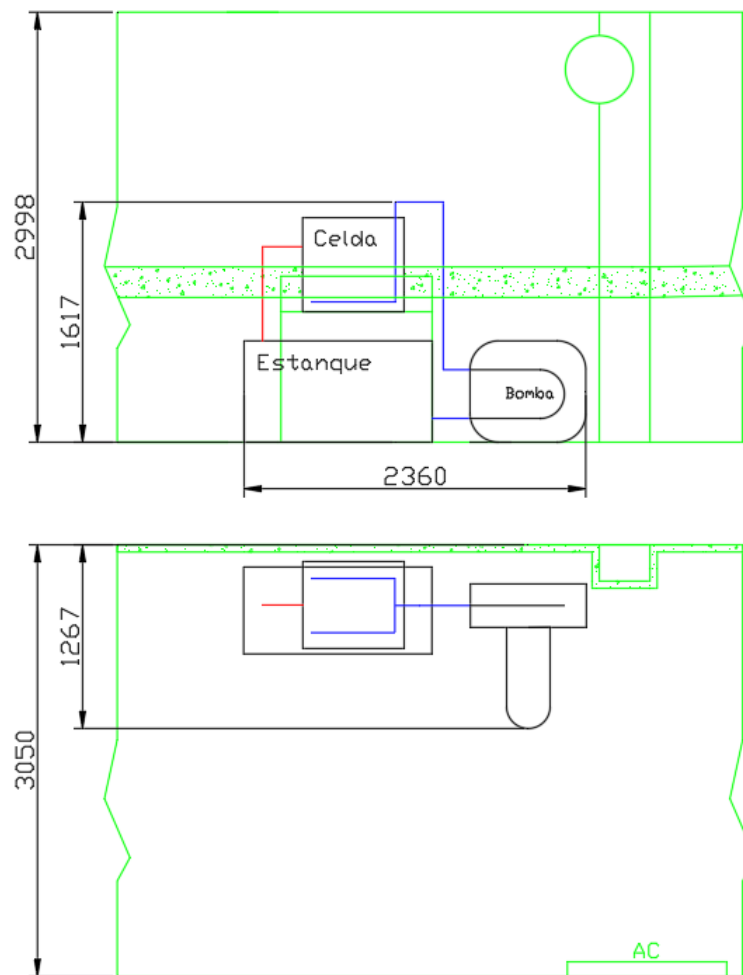


Figura 5.6 Concepto 3

5.3.3. Selección de conceptos

Para poder determinar a través de un criterio claro cuál de estas alternativas es la más competente para desarrollar las funciones del equipo solicitado, se utiliza el método de selección de pesos ponderados. En este criterio se utilizan los objetivos de diseño como

medio para determinar la competencia de cada alternativa. Se considera el peso ponderado de cada objetivo en porcentaje y se le asigna un puntaje a cada alternativa según que tan bien cumplen dicho objetivo.

La escala utilizada corresponde a: 5 puntos, objetivo logrado con creces; 3 puntos, objetivo medianamente logrado; 1 punto objetivo no logrado. Finalmente se suma el puntaje de cada alternativa para obtener aquella que cumple de mejor manera los objetivos de diseño.

En esta oportunidad, y como se puede observar en la tabla 5.7, la alternativa 3 es la seleccionada a partir del método de pesos ponderados.

Tabla 5.7 Selección de concepto a través del método de pesos ponderados.

Criterio	Peso	Concepto					
		Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
		Rango	Puntaje	Rango	Puntaje	Rango	Puntaje
Funcionamiento continuo sin interrupciones de corriente	19	5	95	5	95	5	95
El nivel de electrolito se mantiene sin ocasionar derrames	15,7	5	78,5	5	78,5	5	78,5
Facilidad de recambio del electrolito	10,5	5	52,5	5	52,5	3	31,5
Baja frecuencia de mantenimiento	6,1	3	18,3	3	18,3	5	30,5
Costos de mantenimiento bajos	3,6	5	18	3	10,8	5	18
Vigilancia remota	2,7	3	8,1	3	8,1	5	13,5
Control de niebla ácida	12,5	5	62,5	5	62,5	5	62,5
Salida de gases a los cuatro vientos	9	5	45	5	45	5	45
Resistente a la corrosión y oxidación por ácido sulfúrico	6,7	5	33,5	5	33,5	5	33,5
Partes eléctricas protegidas	2,8	5	14	5	14	5	14
Diseño libre de fugas	3,6	3	10,8	5	18	5	18
Fácil montaje y desmontaje de los electrodos	3	3	9	3	9	3	9
Diseño modular	1,7	3	5,1	3	5,1	3	5,1
Fácil de limpiar	1,4	3	4,2	1	1,4	3	4,2
Diseño compacto	1,1	1	1,1	1	1,1	3	3,3
Transportable	0,4	1	0,4	1	0,4	1	0,4
Puntaje Total	100	456		453,2		462	

6. Diseño de configuración

A continuación, se lleva a cabo el diseño de configuración en base al concepto revisado y seleccionado con el objetivo de desarrollar los sistemas y subsistemas necesarios para cumplir con las funciones definidas anteriormente. Para ello, se inicia definiendo la arquitectura del producto, en donde se disponen físicamente los sistemas y subsistemas, es decir, que equipos o tipos de equipo pueden desarrollar las funciones. Posteriormente, se realiza la configuración de partes y componentes, donde se analiza como debe ser cada uno de los equipos para cumplir con su propósito. Finalmente, se desarrolla el diseño paramétrico, momento en que se toman decisiones concretas en torno a dimensiones, materiales, procesos de manufactura y/o adquisición.

6.1. Arquitectura del diseño

Debido a que en el producto solicitado existen múltiples funciones muy diferentes unas con otras, se selecciona un tipo de arquitectura modular, ya que se requerirá de una gran variedad de equipos diferentes para poder cumplir con cada una de las funciones solicitadas. De esta forma además se puede integrar con mayor facilidad cada módulo en un solo producto final.

La arquitectura modular posee tres tipos diferentes de interfaz: ranura, de bus y seccional. En este caso se implementa la arquitectura modular de ranura, ya que la planta que se debe diseñar consiste en un conjunto de sistemas con funciones independientes, pero relacionadas entre sí para llevar a cabo la funcionalidad deseada.

Para definir la arquitectura, en primer lugar, se realiza el diagrama de componentes y funciones, en el cual se muestran las funciones y subfunciones requeridas para el diseño y los componentes, partes o equipos que pueden cumplir con dicha función. Estos son agrupados en módulos, según la o las funciones que buscan cumplir, tal como se muestra en la figura 6.1.

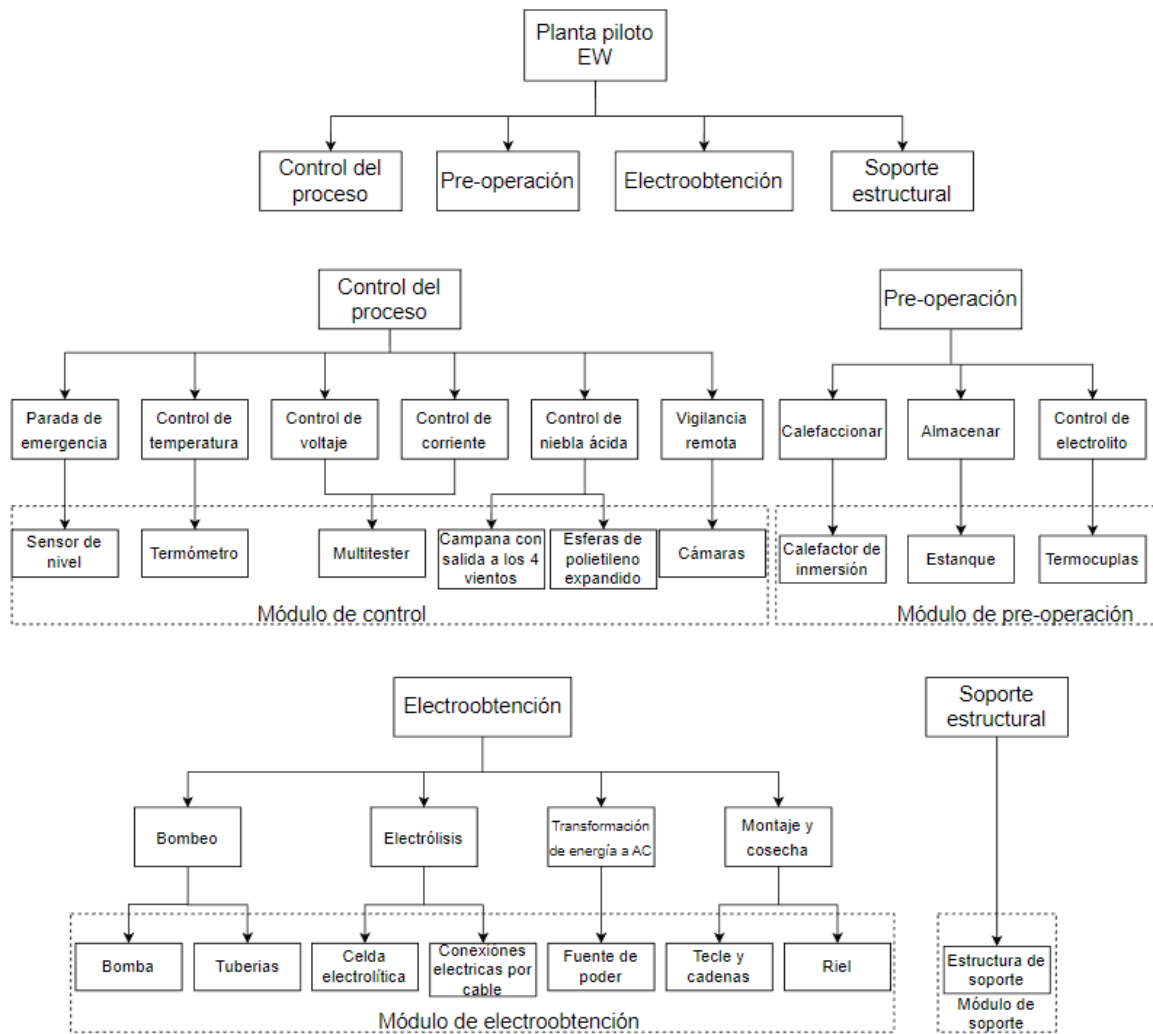


Figura 6.1 Diagrama de componentes y funciones

La planta piloto de EW se puede dividir en 4 módulos: control, pre-operación, electroobtención y soporte. El módulo de control opera en torno al proceso de electroobtención con el objetivo de supervisar que se está llevando a cabo de manera óptima y segura; el módulo de pre-operación almacena y prepara el electrolito necesario para utilizar en el proceso; el módulo de electroobtención opera con todas las funciones necesarias para llevar a cabo la operación; finalmente el módulo de soporte tiene la función de dar el soporte estructural para llevar a cabo el proceso de forma segura.

La Figura 6.2 corresponde a un boceto que recoge los datos obtenidos a partir de los diagramas de la figura 6.1 con el objetivo de clarificar la disposición física de cada módulo y la relación que existe entre ellos.

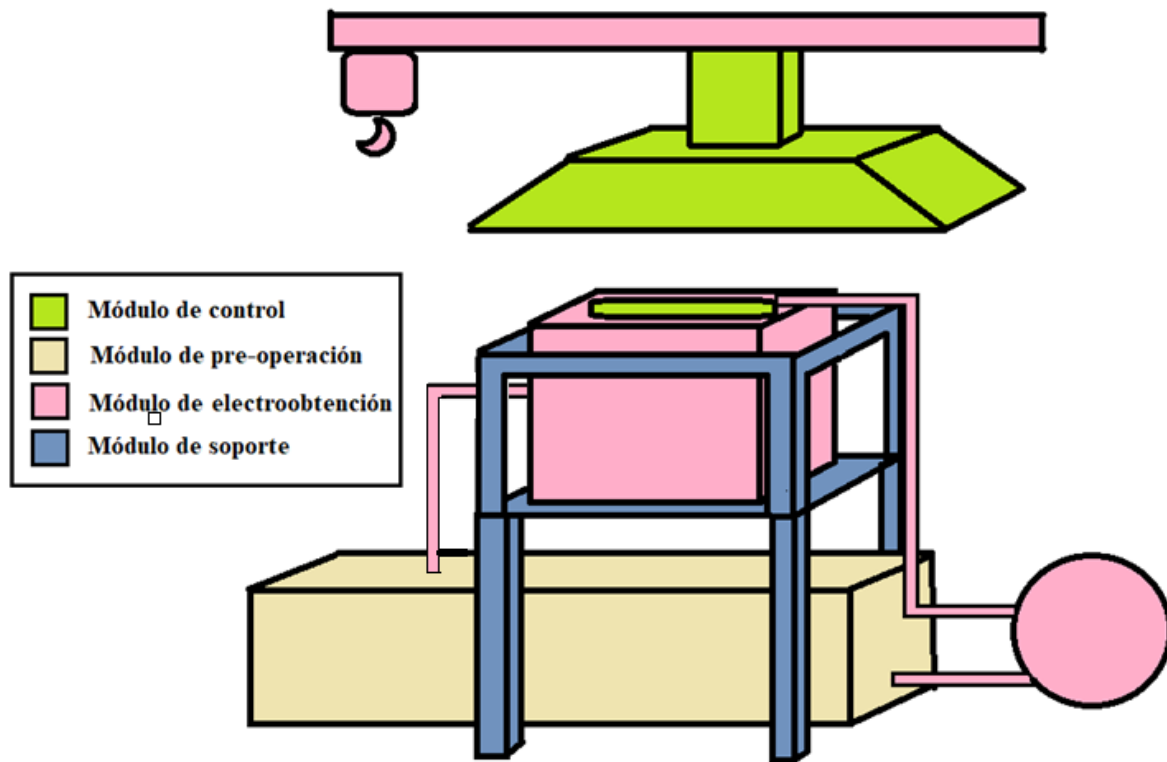


Figura 6.2 Disposición física de los módulos de diseño

6.2. Diseño de configuración

La siguiente etapa consiste en establecer características básicas y requerimientos operacionales para los diferentes equipos y componentes establecidos en el diagrama de la figura 6.1, para ello es importante identificar dos grupos de componentes: los componentes estándar, son aquellos que ya existen en el mercado, por lo que se adquieren desde catálogos; los componentes especializados, son aquellos que no se venden en el mercado, por lo tanto, deben fabricarse.

6.2.1. Componentes estándar

Componentes del módulo de control

(i) Sensor de nivel

Se utilizará un sensor de nivel tipo flotador de carrera corta en la parte superior de la celda como elemento de seguridad ante posibles aumentos en el nivel de la columna de fluido dentro de la celda. El sensor se sostiene verticalmente (misma posición que se observada en la figura 6.3) en la parte superior de la celda electrolítica por encima de la superficie libre del fluido de trabajo (modo off). Si el nivel del fluido aumenta hasta elevar el flotador del sensor (modo on), este tiene la función de enviar una señal a un actuador, en este caso un relé, el cual envía la señal de cortar la energía que alimenta la bomba, la cual corresponde al elemento final de control.

El aumento en el nivel de la columna de agua puede ser indicio de que el fluido no estaría recirculando hacia el estanque de almacenamiento, por obstrucciones en la salida de fluido u otras razones. Utilizando este sistema es posible prevenir este tipo de accidentes.

En la figura 6.3 se puede observar el sensor seleccionado y, además, información relevante para la instalación y puesta en marcha del equipo.



Figura 6.3 Switch de nivel seleccionado e información técnica

(ii) Sensor de temperatura

Este se ubicará de manera vertical dentro de la celda electrolítica para medir la temperatura del fluido dentro de esta. Además, se utilizará un visualizador digital del valor de la medición, para facilitar el control y registro del parámetro.

Se selecciona un sensor de temperatura tipo bulbo de inmersión comercializado por la empresa Veto Ltda., empresa chilena dedicada a la comercialización de instrumentos de medición, control y registro de variables físicas, químicas y eléctricas en diversos rubros. El equipo se compone por el sensor, capaz de registrar la medición (figura 6.4.a) y un vaina protectora para el bulbo, donde se inserta el sensor y tiene contacto directo con el fluido (figura 6.4.b)

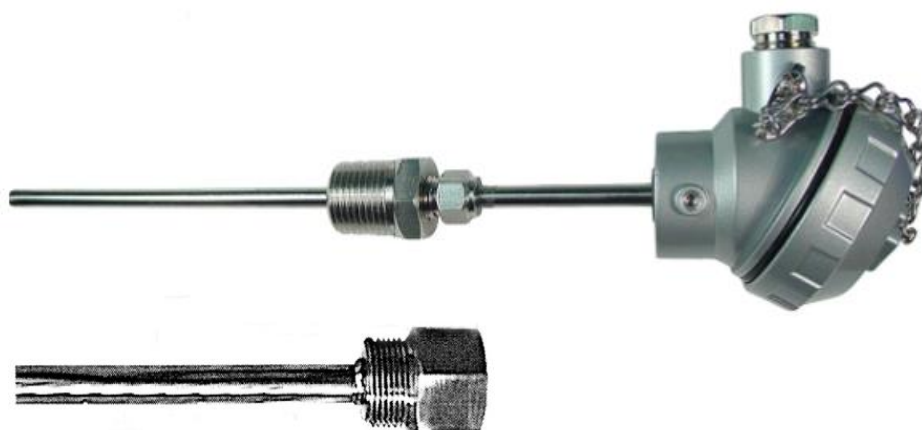


Figura 6.4. (a) Sensor de temperatura y (b) vaina protectora

Las características del sensor seleccionado se especifican en la tabla 6.1, donde L1 corresponde al largo del bulbo, el cual corresponde a la zona sensible a la medición. Para obtener más información sobre los equipos utilizados en este punto, tanto sensor como visualizador, se pueden encontrar sus respectivas fichas técnicas en el anexo B.

Tabla 6.1 Especificaciones sensor de temperatura

CÓDIGO	L1	UNIÓN CONO COMPRESIÓN	TEMP.MÁX.	DESCRIPCIÓN
K1030207	100 mm	1/4 NPT	-50 + 500 °C	Cabezal Aluminio NEMA 4
K1030002		1/2 NPT		
K1031203	150 mm	1/4 NPT		
K1031009		1/2 NPT		
K1033206	300 mm	1/4 NPT		
K1033001		1/2 NPT		
K1082037	150 mm	SIN HILO		
K1082304	200 mm			
K1085001	350 mm			

(iii) Multímetro digital

Para validar la información entregada por la fuente de poder y garantizar que la corriente que sale de esta se mueve dentro de todo el circuito eléctrico y llega a los electrodos de manera óptima, se utilizará un multitester digital. Este se utilizará para medir parámetros de corriente y voltaje en el circuito. Además, se empleará para medir resistencia tanto en ánodos como en cátodos antes de iniciar las pruebas de electrólisis.

(iv) Esferas antiniebla ácida

En EW industrial se utilizan habitualmente tres capas de esferas de polipropileno o polietileno de alta densidad que cumplen con el objetivo de retener la mayor cantidad de burbujas que se liberan en la superficie libre de la celda. Estas esferas poseen un diámetro estándar de 20 mm y serán facilitadas por la empresa Inppamet.

(v) Cámaras

Debido a que el proceso se debe llevar a cabo por varios días consecutivamente, es necesario contar con monitoreo constante del proceso y los parámetros operacionales de este. Por lo que se requiere contar con cámaras para vigilar de manera remota e instantánea el proceso en general y en particular de los parámetros de temperatura y voltaje en la celda.

Para esto se utilizarán cámaras ya disponibles en el laboratorio. Estas corresponden a cámaras interiores Marca Foscam modelo FI9926P (figura 6.5) con conexión a wifi DUAL 204Ghz/5Ghz y zoom óptico x4 con alta calidad de video. Disponen de detección de movimiento, visión nocturna de hasta 10 metros, rotación vertical y horizontal y visualización en tiempo real desde cualquier dispositivo vinculado (smartphone, PC, etc.). Posee dimensiones de 115 x 103 x 125 mm³, un peso neto de 420 gramos y un consumo energético inferior a 9,5 W.



Figura 6.5 Cámaras de vigilancia remota

Componentes del módulo de pre-operación

(i) Calefactor

Debido a la configuración del estanque de almacenamiento, se selecciona un calefactor de inmersión. Este debe estar fabricado en un material resistente al medio ácido, por lo que se debe utilizar acero 316 o 316L para la fabricación de las resistencias en contacto con el fluido ácido. Para disminuir la probabilidad de fuga de electrolito se busca una opción en la que la sujeción del calefactor se encuentre en la pared superior del estanque.

Estas serán fabricadas por la empresa Comind, uno de los mayores fabricantes de resistencias eléctricas y equipos de alta gama en Sudamérica. La figura 6.6 corresponde a una imagen referencial del diseño de la resistencia. La parte superior, que se posiciona por fuera del estanque, corresponde al controlador de temperatura y posee la conexión por cable y el botón regulador. El sistema cuenta, además, con un tubo frío saliente desde el controlador, el cual sostiene la resistencia calefactora que posee forma en espiral. Todos los componentes de este equipo son fabricados en acero inoxidable 316 y la conexión eléctrica es mediante conector industrial monofásico. Por otro lado, según

especificación del fabricante, la resistencia debe estar sumergida por lo menos 150 mm en el fluido de trabajo.

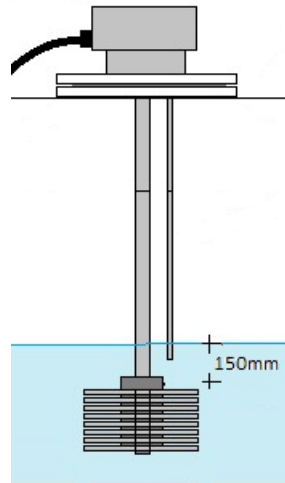


Figura 6.6 Imagen referencial del equipo calefactor

(ii) Sensor de temperatura

El sensor se ubicará dentro del estanque de almacenamiento con el objetivo de controlar la temperatura dentro de este. El equipo seleccionado para esto será el mismo utilizado en el módulo de control y comercializado por la empresa Veto, con la diferencia que en este caso se contará con un bulbo y vaina protectora de 300 mm de largo. Y al igual que el anterior, contará con un visualizador digital para el registro de la medición. Para obtener más información sobre este último se puede consultar el anexo B.

Componentes del módulo de electroobtención

(i) Bomba

Como se determinó en la selección de conceptos, se debe escoger una bomba peristáltica al ser las más adecuadas para operar en este tipo de procesos, ya que solo la manguera tiene contacto con el fluido, minimizando la ocurrencia de fallas en la bomba por el ácido sulfúrico o presencia de sólidos en el fluido. Además, posee baja frecuencia y bajos costos asociados al mantenimiento, ya que solo requiere del cambio dicha manguera.

En la tabla 6.2 se enumeran las bombas cotizadas y algunas características asociadas para su comparación, además, en el anexo B se incluye la curva de operación de cada una de ellas con el objetivo de tener toda la información necesaria para seleccionar la bomba más conveniente, en estas curvas se incluye el caudal de operación, la temperatura máxima admisible y potencia de trabajo según la presión de descarga estimada por el vendedor. También se puede observar el caudal máximo admisible por la bomba a una temperatura de operación de 50°C a la presión calculada. Es importante mencionar que cada una de estas bombas tienen la capacidad mínima para cumplir con las condiciones de operación, es decir con un caudal de 92 l/min a 50°C en trabajo continuo.

Tabla 6.2 Selección de bomba peristáltica

Empresa	Marca y modelo	Presión descarga (bar)	Caudal de bombeo máx. (l/h)	Diámetro manguera (mm)	Material manguera	Autocebante	Dimensiones generales LxWxH (mm ³)	Precio (CLP)	Plazo de entrega (días)
Watson Marlow	Bredel 50	7.5	17500	50	EPDM	hasta 9,5 m	838x975x811	12,885,700	95
Termo equipos	Peribest C55	7.5	13000	55	EPDM	hasta 9,5 m	820x947x820	12,170,850	45
Tecfluid	Abaque HD50	5	15300	50	NR	hasta 9,5 m	835x1020x825	6,632,528	20
Tecfluid	Abaque HDX40	5	9600	40	NR	hasta 9,5 m	707x810x625	7,360,337	35
Prominent	DFCa 060	4	6000	55	NR	SI	735x790x805	10,353,000	30

La bomba Abaque HDX40 se descarta ya que, aunque al caudal y temperatura de operación, 92 l/min y 43°C respectivamente, es admisible en trabajo continuo, al considerar una temperatura de 50°C, posee un flujo máximo de operación de 80 l/min. La bomba Peribest C55 también es descartada, debido a que las condiciones de operación del proceso están en el límite del rango de operación en trabajo continuo.

Finalmente, la bomba seleccionada para la circulación del electrolito entre el estanque de almacenamiento y la celda electrolítica corresponde a una bomba peristáltica de desplazamiento positivo marca Abaque, modelo HD50, exportada desde Francia por la empresa tecfluid. Aunque el resto de las bombas cotizadas también cumplen con los requerimientos, los plazos de entrega, el precio competitivo y la disponibilidad de mantenimiento en Chile de este equipo cuenta como factor determinante.

La figura 6.7 corresponde a la curva de operación de la bomba seleccionada. En esta se ubica un punto rojo que corresponde a la intersección entre el caudal requerido por la operación, de 92 litros/min, y la presión de descarga calculada por el vendedor de 5 bar. Dicha información permite establecer que la bomba Abaque puede operar a una temperatura de más de 60 °C en trabajo continuo y tiene una potencia de motor requerida de 2,5 kW. Es destacable, además, que a una temperatura de 50°C puede operar en trabajo continuo con caudales de hasta 130 litros/min aproximadamente.

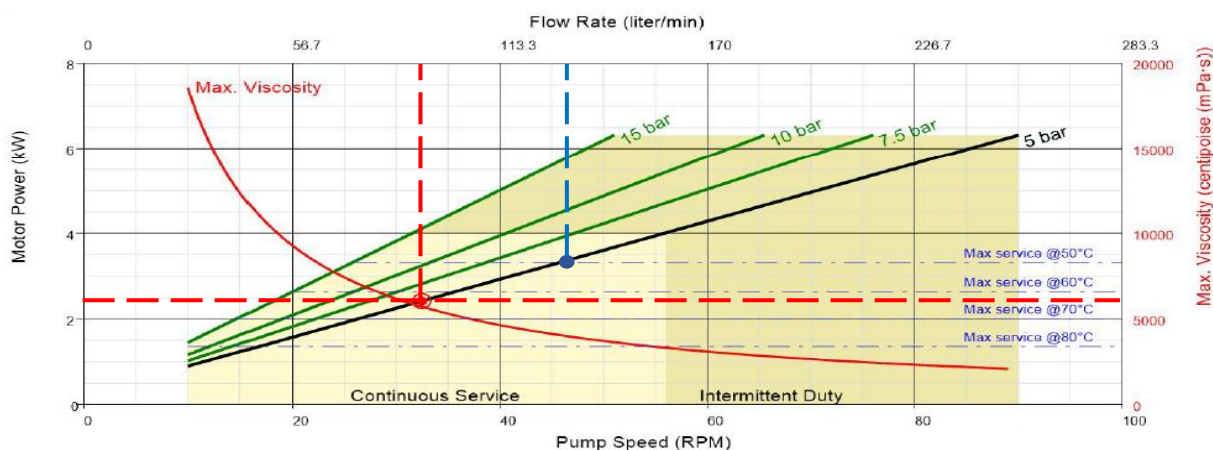


Figura 6.7 curva de operación bomba Abaque HD50

La empresa recomienda la utilización de una manguera fabricada de caucho natural, la cual soporta temperaturas de hasta 80°C a 16 bar de presión; es altamente elástica y con excelente resistencia a la abrasión. Posee un largo de 1820 mm. Tanto la succión como la descarga de la bomba poseen diámetro interior de 50 mm y diámetro exterior de 80 mm (diámetro del flange). Las dimensiones generales de la bomba se pueden observar en la figura 6.8. En el anexo B se puede encontrar más información sobre el equipo.

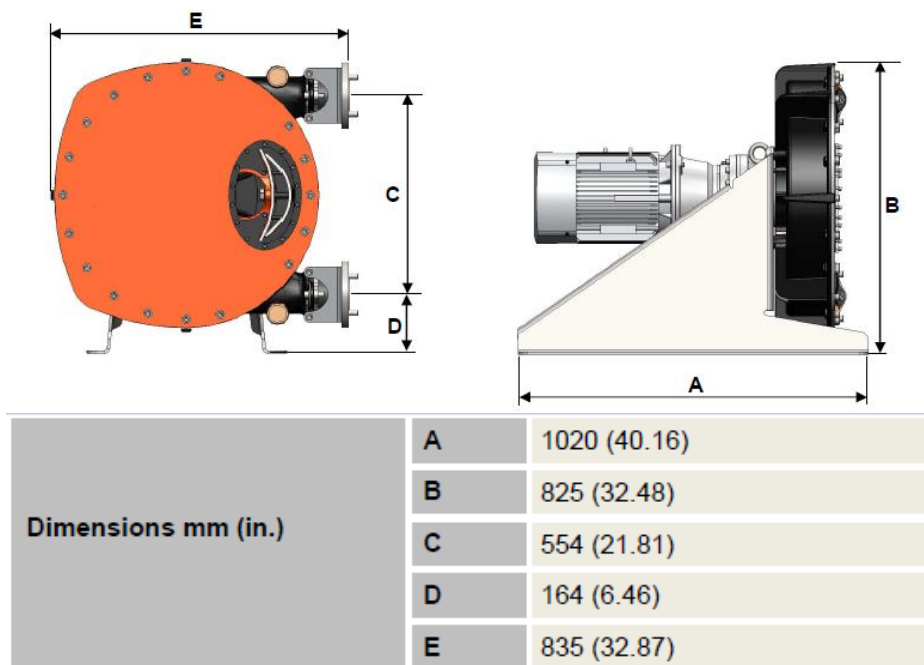


Figura 6.8 Dimensiones bomba Abaque HD50

(ii) Tuberías y fitting

Las tuberías tienen la función de trasladar el fluido desde el estanque de almacenamiento hasta la celda electrolítica a través de la bomba. Y, por otro lado, retornar el fluido desde la celda hacia el estanque. Para la selección de dichas tuberías, en primer lugar, se debe tener en consideración el diámetro de la manguera de la bomba. Esta posee un diámetro interior de tubería de 50 mm, por lo tanto, en primera instancia se espera utilizar tuberías con dicho diámetro. En el siguiente capítulo, diseño de detalle, se establecerá si bajo

dicho valor se cumplen los requerimientos de trabajo. Además, se determinará la cantidad de tuberías y fitting necesarios para conectar los diversos equipos.

(iii) Fuente de poder

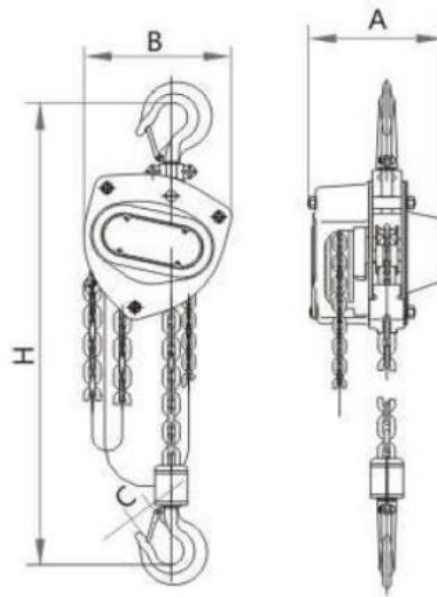
La fuente de poder tiene la función de suministrar la corriente continua al proceso para que ocurra la electrólisis. El operador debe fijar el voltaje de trabajo, que es el parámetro que se busca optimizar en las pruebas de electroobtención, por lo tanto, la corriente necesaria es determinada por el proceso y variable a lo largo de él, según los valores de resistencia que se encuentren durante la operación. Debido a esto se debe contar con una fuente de poder con un rango de corriente suficiente para alimentar al proceso.

Como antecedente, se poseen los valores de corriente de las pruebas de laboratorio, en donde, con voltajes de 1.7 V, se obtuvo una corriente promedio de 0.2 A, con un máximo de 0,8 A al inicio de las pruebas, donde existen menores resistencias y por lo tanto mayor corriente.

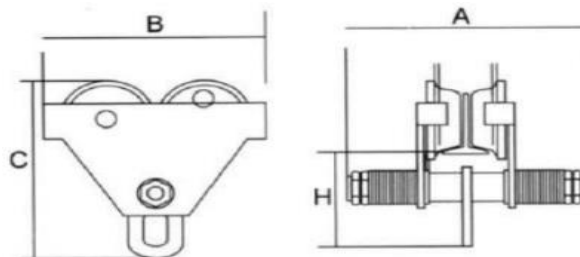
(iv) Tecla

El tecla tiene la doble función de montaje y desmontaje de electrodos y además de sostener la campana de extracción. Para ello se determina que un tecla manual es la opción más viable debido a su facilidad de operación y sus costos más accesibles. Además, para maniobrar el tecla a lo largo de la viga se debe contar con un carro de tiro, el cual también será manual, sopesando las mismas consideraciones anteriores. Para poder seleccionar los equipos adecuados se debe determinar con mayor precisión la carga a la cual estará sometida el sistema.

Se selecciona un tecla manual marca Jentan modelo JTVD-0.5 con capacidad para soportar cargas de hasta 500 kg y un carro de tiro marca Jentan modelo JTPT-B-1.0 con capacidad de carga de 1 tonelada, ambos corresponden a la mínima capacidad de carga disponible en el mercado actualmente y son comercializados por Inamar Izaje. En la figura 6.9 se pueden apreciar las dimensiones de ambos equipos. Más información se puede encontrar en el anexo B. Por otro lado, las cargas estimadas que deberán ser soportadas por estos equipos serán determinadas en el capítulo siguiente.



Modelo	Capacidad (Ton)	Izaje (m)	N° Bajadas	Diámetro Cadena (mm)	Dimensiones (mm)				Peso (Kg.)
					A	B	C	H	
JTVD-0.5	0.5	3	1	5	132	148	28	345	11
JTVD-1.0	1.0	3	1	6	151	172	32	376	12.5
JTVD-2.0	2.0	3	1	8	175	210	36	470	19.5
JTVD-3.0	3.0	3	1	10	176	230	42	565	29



Modelo	Capacidad (Ton)	Radio Min(mm)	Ancho Ala (mm)	Dimensiones (mm)				Peso (Kg.)
				A	B	C	H	
JTPT-B-1.0	1.0	1.0	64 – 140	244	250	200	110	8.08
JTPT-B-2.0	2.0	1.1	88 – 203	280	275	230	125	12.2
JTPT-B-3.0	3.0	1.3	102 – 203	340	315	290	160	21

Figura 6.9 Dimensiones tecla y carro de tiro.

(v) Riel

El riel tiene como función entregar un rango de movimiento al carro de tiro, para dicha función se selecciona un perfil IPE o doble T de caras paralelas. Este tipo de perfil se caracteriza porque las caras exteriores e interiores de las alas son perpendiculares al alma, por lo que tienen espesor constante, esto lo hace ideal para el desplazamiento del carro. Las uniones entre las caras del alma y las caras anteriores de las alas son redondeadas, fabricados a partir de flejes mediante el proceso de electrosoldadura de alta frecuencia. La relación entre el ancho de las alas (b) y la altura (h) se mantiene inferior a 0,66 (ver figura 6.10). Las medidas de la viga a utilizar se determinan según las especificaciones ancho de ala admisible por el carro de tiro, de esta forma se selecciona una viga IPE120, ya que el ancho de ala de esta viga se encuentra dentro de rango permitido por el carro y es fácilmente encontrada en el mercado (ver figura 6.9). Se

requerirá de 3 metros de viga, sobresaliendo por ambos lados del banco de pruebas, por el costado izquierdo se realizará la maniobrabilidad del izaje y el costado derecho será destinado a la posición de descanso de la campana mientras se utiliza el teclé para el izaje. La viga se fijará al techo mediante pernos de anclaje y se pintará con esmalte blanco para conservar la línea de diseño del laboratorio. Para realizar el enganche de los electrodos se utilizará una eslinga de 1" con correas de amarre y ganchos. Para los ánodos nanoestructurados el enganche se hará a través de las sujeciones de ojal, y para el resto de los electrodos las correas deberán abrazar el cátodo y engancharse en sí misma.

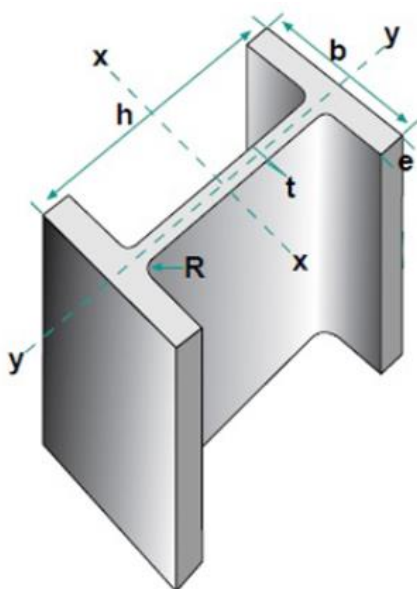


Figura 6.10 Sección transversal viga IPE

6.2.2. Componentes especializados

Estos componentes corresponden a aquellos que no existen en el mercado, por lo que deben ser diseñados y fabricados a medida para la operación. En este caso, estos componentes corresponden a la campana extractora del módulo de control; al estanque de almacenamiento del módulo de pre-operación; la celda electrolítica y conexiones eléctricas del módulo de electroobtención; y la estructura de soporte del módulo de soporte.

(i) Campana con salida a los cuatro vientos

Para la extracción de los gases producidos por la niebla ácida, se requiere de un sistema extractor con salida a los cuatro vientos, esto quiere decir que los gases deben escapar por sobre la techumbre del edificio, alejados de cualquier posible contacto con personas o estructuras.

Por otro lado, como la campana debe cubrir toda la superficie de la celda, se dificulta encontrar una existente en el mercado que, además, sea resistente al medio corrosivo. Para definir las dimensiones de la campana se debe tener en consideración la geometría de la celda electrolítica, sobre la cual trabaja la campana; la altura disponible entre el banco de pruebas y el techo y además el diámetro de la manga de extracción que conecta la campana al ducto del extractor instalado en el techo del edificio.

En la figura 6.11 se puede observar el modelo y las dimensiones generales de la campana. Al igual que la celda electrolítica, la campana posee una geometría rectangular en su base inferior cuyas medidas, 1020 x 920 mm², son mayores a las de la celda (ver figura 6.13) para garantizar mayor seguridad en la extracción de los gases. Se estima que la altura libre entre el banco de pruebas y el techo es de alrededor de 1400 mm, por lo tanto se modela la campana con una altura de 400 mm, permitiendo espacio para la viga y la maniobrabilidad del tubo flexible conector. Por otro lado, dicho tubo posee un diámetro de 200 mm, por lo que se modela en la campana una sección circular del mismo tamaño para poder encajar ambas piezas. Finalmente, se dispone en la parte superior de un borde con agujeros en cada esquina que permita la sujeción de la campana.

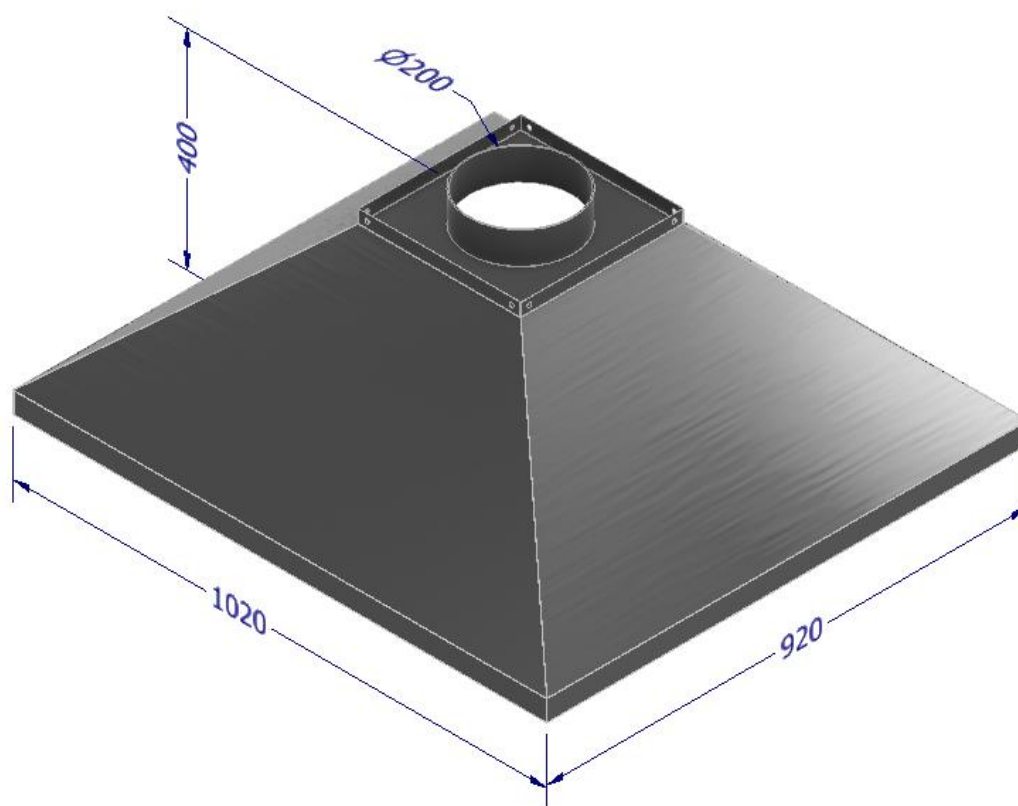


Figura 6.11 Modelo campana de extracción

(ii) Estanque de almacenamiento

Para el diseño del estanque se debe considerar el espacio disponible dentro del laboratorio y los requerimientos del cliente. Además, se debe tener en consideración que todos los equipos del módulo de pre-operación operan en torno a este estanque, por lo que debe contar con todos los requerimientos necesarios para el correcto funcionamiento de estos.

Como señala el concepto seleccionado, el estanque se ubica bajo la celda electrolítica. Para optimizar su geometría, se busca almacenar la mayor cantidad de volumen en el largo del estanque, considerando que el laboratorio posee un ancho de 2980 mm. Para mantener un flujo constante y seguro hacia la celda se busca disponer un estanque para una capacidad mínima de 500 litros.

La figura 6.12 corresponde al modelo utilizado para la fabricación del estanque, el cual posee dimensiones de (LxWxH) 1300 x 600 x 700 mm³ y 546 litros de volumen total. En el siguiente capítulo se detalla información respecto a materiales de fabricación, variaciones en el diseño y los agujeros necesarios. Los planos de adjuntan en el anexo B.

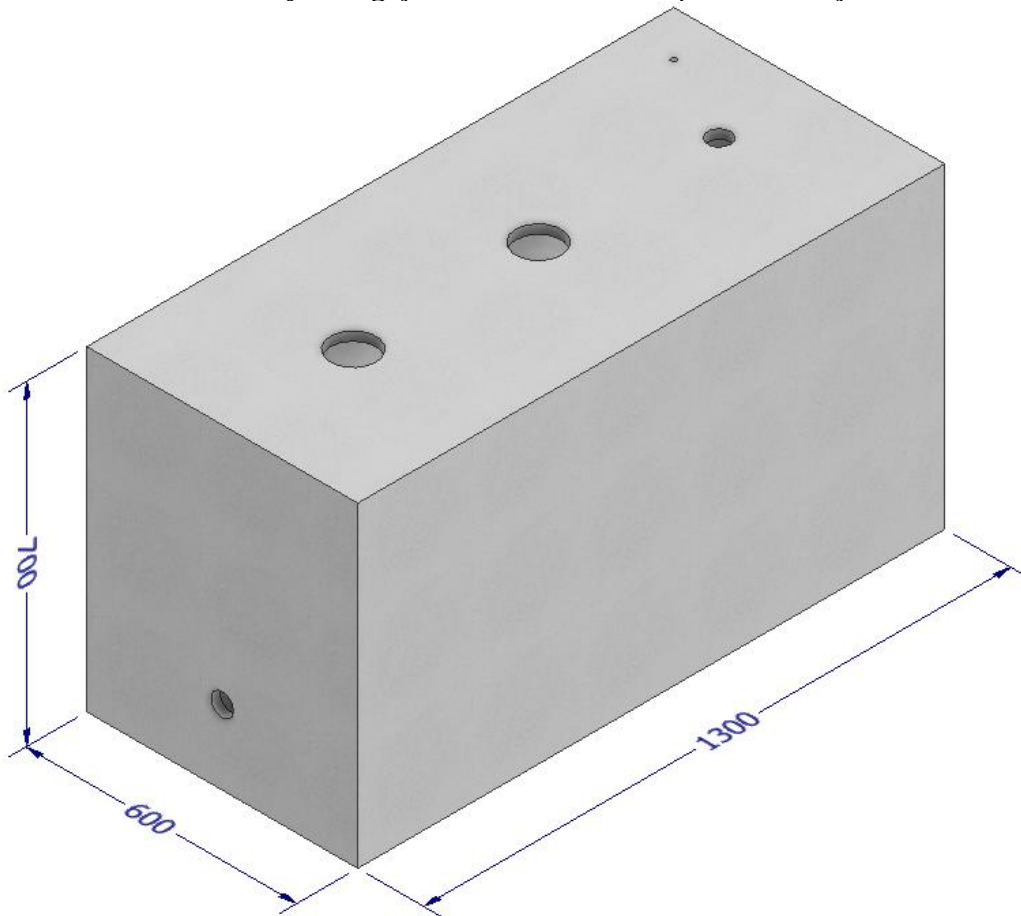


Figura 6.12 Modelo estanque de almacenamiento

(iii) Celda electrolítica

La celda electrolítica se diseña en función a los requerimientos del cliente con dimensiones (LxWxH) de 700x600x630 mm³ y un volumen total de 265 litros, el volumen requerido por el proceso, de 180 litros, se alcanza a la altura del agujero de rebalse, el cual se ubica 200 mm por debajo de la boca de la celda (ver figura 6.13). Además, para minimizar la probabilidad de fugaz de electrolito, se busca fabricar la celda en una sola pieza. El plano de este modelo puede encontrarse en el anexo B.

Para ubicar los electrodos dentro de la celda se incluye un alero en el borde superior para soportarlos. Y, además, se incluye en el diseño una pestaña lateral por ambos costados a lo largo de la celda para facilitar la instalación de las conexiones eléctricas.

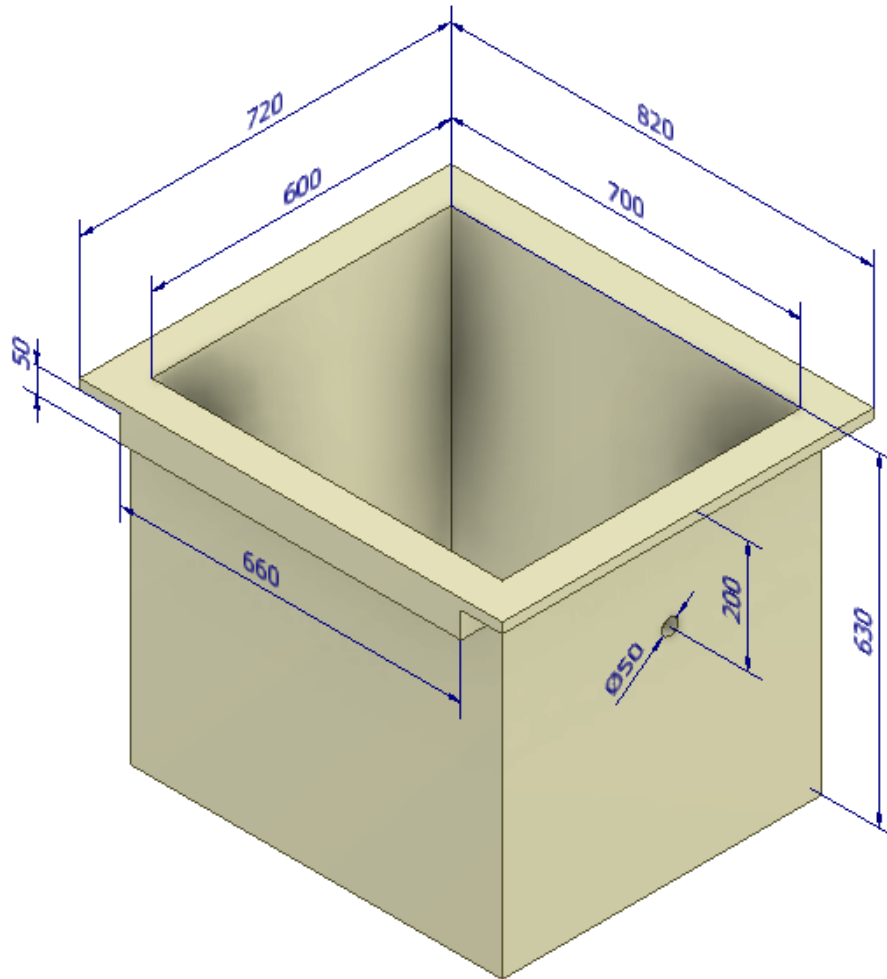


Figura 6.13 Modelo celda electrolítica

(iv) Conexiones eléctricas

La celda electrolítica está diseñada para operar con 5 electrodos como máximo. De los cuales, según las pruebas que se deseen realizar, pueden ser 3 cátodos y 2 ánodos o, 2 cátodos y 3 ánodos. Por lo tanto, se debe contar con la posibilidad de conectar 3 electrodos tanto al polo positivo como al polo negativo.

Las conexiones eléctricas deben darse desde la fuente de poder hasta las barras de cobre de los electrodos. Para ello se utilizarán pletinas de cobre como punto intermediario. Estas pletinas se ubicarán, como se mencionó anteriormente, en las pestañas laterales de la celda electrolítica (ver figura 6.13) y se unirán mediante cables eléctricos, a su respectivo polo de la fuente de poder. Esta pletina contará además con las conexiones

necesarias para conectar, también mediante cables eléctricos, tantos electrodos como sea necesario para la prueba.

En el diseño de detalle se determinará la longitud de dicha pletina, la cantidad y tamaño de los agujeros que dispondrá según los elementos de fijación disponibles conforme el tamaño de cable y terminales eléctricos requeridos por la operación.

(v) Soporte estructural

El soporte estructural tiene como objetivo, en primer lugar, dar seguridad tanto a la celda electrolítica como al estanque de almacenamiento. Además de optimizar el espacio disponible y facilitar la circulación del fluido al soportar la celda por sobre el estanque de almacenamiento. Por estas razones debe estar fabricado en materiales resistentes al peso de la celda y del fluido en su interior. Y, a su vez, ser resistente al medio corrosivo.

En la parte inferior del soporte se debe albergar un estanque de (LxWxH) 1300 x 600 x 700 mm³, el cual debe estar resguardado de posibles golpes al transitar dentro del laboratorio. Además, se debe contar con espacio suficiente para montar los equipos del módulo de pre-operación dentro de dicho estanque, para ello se estima de una altura de 200 mm por sobre la cara superior. En la parte superior del soporte se debe situar la celda electrolítica con dimensiones de (LxWxH) 700 x 600 x 630 mm³ y soportar el peso del electrolito de aproximadamente 250 litros.

Por razones de costo se busca diseñar la estructura en perfiles de acero estructural ampliamente disponibles en el mercado y proteger el material con pinturas diseñadas para dicha función. La figura 6.14 muestra un modelo inicial de la estructura, diseñada con perfiles cuadrados de acero estructural de 40 x 40 mm. En la etapa final de diseño de detalle se debe validar este modelo según las dimensiones y pesos finales de los estanques a contener.

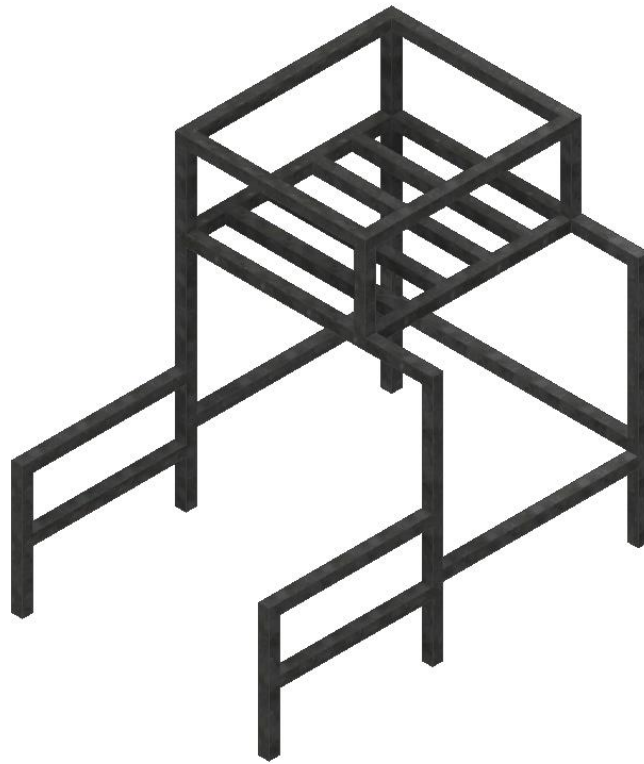


Figura 6.14 Modelo inicial estructura de soporte.

As a result, the 16% decline in GDP per capita has been accompanied by a 10% fall in

ITEM	CANTIDAD	NOMBRE DEL EQUIPO
------	----------	-------------------

4	1	Estructura de soporte
3	1	Bomba peristáltica
2	1	Estanque de almacenamiento
1	1	Celda electrolítica

7. Diseño de detalle

A continuación, en la etapa final de diseño, se debe disponer de toda la información faltante relativa a cada pieza u equipo para obtener todas las especificaciones tanto para los componentes a fabricar, como para componentes estándar. El diseño de detalle será realizado por módulo, con el objetivo de facilitar el desarrollo de las actividades previas a la implementación del banco de pruebas.

7.1. Configuración módulo de control

Este módulo está conformado por aquellos equipos cuya función es medir parámetros y otorgar seguridad operacional al proceso de electrólisis llevado a cabo dentro de la celda electrolítica, esto es, control de niebla ácida, control de temperatura y control de nivel.

7.1.1. Control de niebla ácida

El primer método de control en ser configurado corresponde a la extracción de gases a los cuatro vientos. Para ello se utiliza un ventilador centrífugo de aspiración simple ATEX serie CMPT(1), fabricado en polipropileno, apto para trabajo con gases ácidos, con rodete de álabes hacia adelante directamente acoplado al eje del motor, IP55, clase F y protector térmico incorporado, para temperatura de trabajo de -10°C a $+60^{\circ}\text{C}$. El ventilador extractor se encuentra instalado en el techo del edificio B del campus y baja hasta las instalaciones del laboratorio a través de 10 metros de ducto de polímero anticorrosivo de 110 mm de diámetro. En la figura 7.1 se puede apreciar el ventilador seleccionado, la ficha técnica del equipo se encuentra en el Anexo B.



Figura 7.1 Ventilador centrífugo de aspiración simple ATEX serie CMPT(1)

Este sistema cuenta, además, con la campana de extracción diseñada a medida, cuyo modelo se puede observar en la figura 6.9, fabricada en acero gris y recubierta con Sikaguard antiácido, un recubrimiento epóxico-novolac de alta resistencia química. Esta se conecta con una manguera semirrígida de 200 mm de diámetro que permite el movimiento de la campana desde su posición de descanso (a un costado del banco de pruebas) a su posición de trabajo

(sobre la celda electrolítica), dicho movimiento se hará a través de la viga instalada sobre el banco de pruebas y utilizando el carro y tecla descritos en el capítulo anterior. La unión entre la manguera y la tubería del extractor se realiza mediante la utilización de fitting conector reductor de tuberías de PVC. La figura 7.2 representa el sistema de extracción en su posición de descanso. Además, se emplearán esferas de polipropileno de 20 mm de diámetro proporcionadas por Inppamet complementadas con esferas de plumavit de 25 mm de diámetro para el control preventivo de generación de niebla ácida.

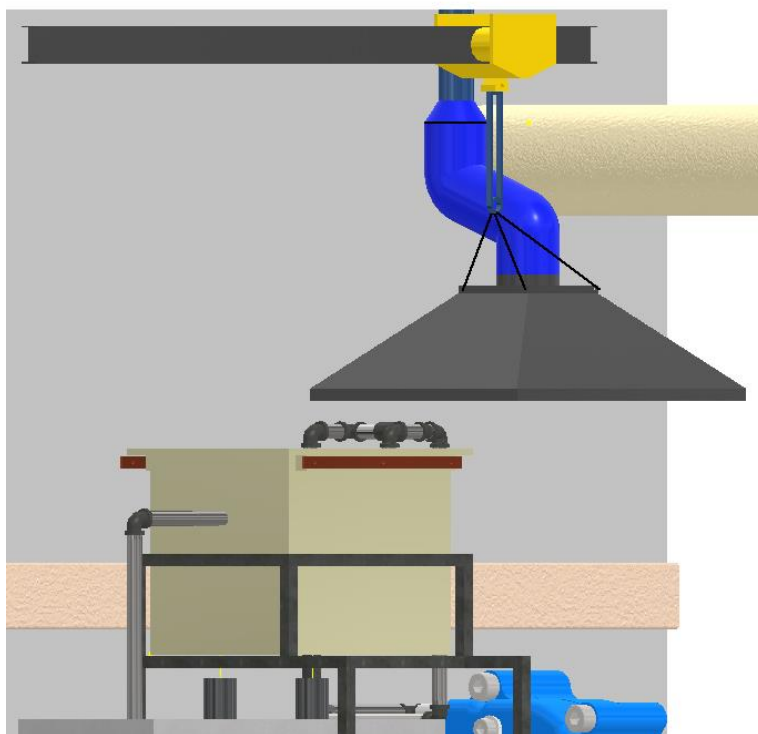


Figura 7.2 Representación sistema de extracción para el control de niebla ácida.

7.1.2. Control de temperatura

Para el control de la temperatura del electrolito dentro de la celda, como se menciona en el capítulo anterior, dicha medición es realizada por un sensor PT100 con un bulbo de 10 cm de largo. Según el diseño de la celda, el nivel del fluido está 20 cm por debajo del borde superior de la celda, por lo que, para poder realizar el contacto entre el sensor y la superficie libre del electrolito se hace necesaria la utilización de un soporte pedestal. Se diseña en acrílico de 8 mm de espesor un soporte angular en forma de Z cuyo diseño se puede apreciar en la figura 7.3. Este se sujetará en la pestaña superior de la celda mediante la utilización de pernos hexagonales cincados M8-1.25 x 60 calidad 8.8, tuercas hexagonales y golillas planas con iguales características. Adicionalmente, para mejorar la calidad de la medición se utiliza pasta térmica entre la vaina y el bulbo mejorando la conductividad entre ambos materiales.

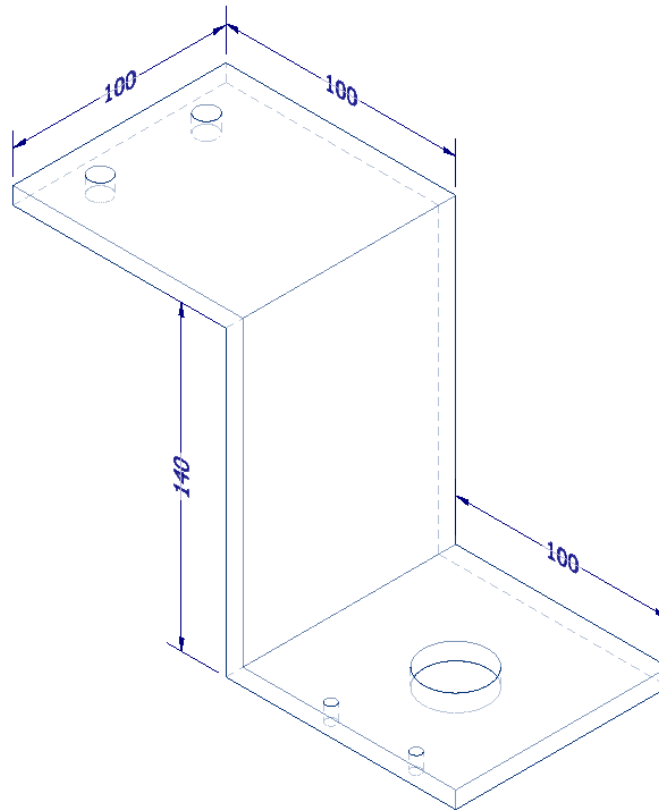


Figura 7.3 modelo soporte angular

Por otro lado, dicho sensor se conecta al visualizador digital mediante un cordón con 3 cables según las instrucciones del equipo. Esta instalación debe ser realizada por un instrumentista especialista en dicho trabajo. Además, se diseña en acrílico de 8 mm de espesor una caja para contener y resguardar el visualizador. Esta caja será compartida con el visualizador del sensor de temperatura del módulo de pre-operación.

Por último, se configura el sensor de nivel. Para instalar el switch dentro de la celda se utilizará el soporte angular de la figura 7.3. Para la conexión eléctrica se requiere de un cordón con 2 cables y se configura para poder detener la bomba cuando se activa y mantenerla encendida en su posición de descanso, para ello se utiliza un relé de 24 V, tensión utilizada en equipos de control, y un transformador de voltaje de 220V a 24V. Este sistema se incorporará al control de puesta en marcha de la bomba.

7.2. Configuración módulo de pre-operación

Todos los equipos de este módulo se conforman dentro del estanque de almacenamiento. Por lo tanto, se debe considerar un medio de sujeción de cada uno de estos, los cuales corresponden a los calefactores y el sensor de temperatura. Además, se deben considerar los agujeros para la succión de la bomba y el rebalse desde la celda electrolítica al estanque.

Según las características de los equipos seleccionados en el capítulo anterior, el sensor de temperatura posee un diámetro de sujeción de $1/2$ in, con hilo NPT. Por otro lado, según el fabricante, los sensores de temperatura requieren de un diámetro de 100 mm para ser

insertado en el estanque. Todos los cálculos y características adicionales relacionados con el calefactor serán descritos más adelante en este título.

Finalmente, tanto el agujero de succión, por donde la bomba extrae el fluido; como el agujero de rebalse, por donde el fluido retornará al estanque desde la celda por medio de gravedad, poseen un diámetro de 50 mm, en donde, en ambos casos, se adicionará un fitting de salida de estanque a presión de PVC con 2 empaquetaduras para poder hacer la conexión a las tuberías. La figura 7.4 representa la ubicación de cada uno de los agujeros en el estanque.

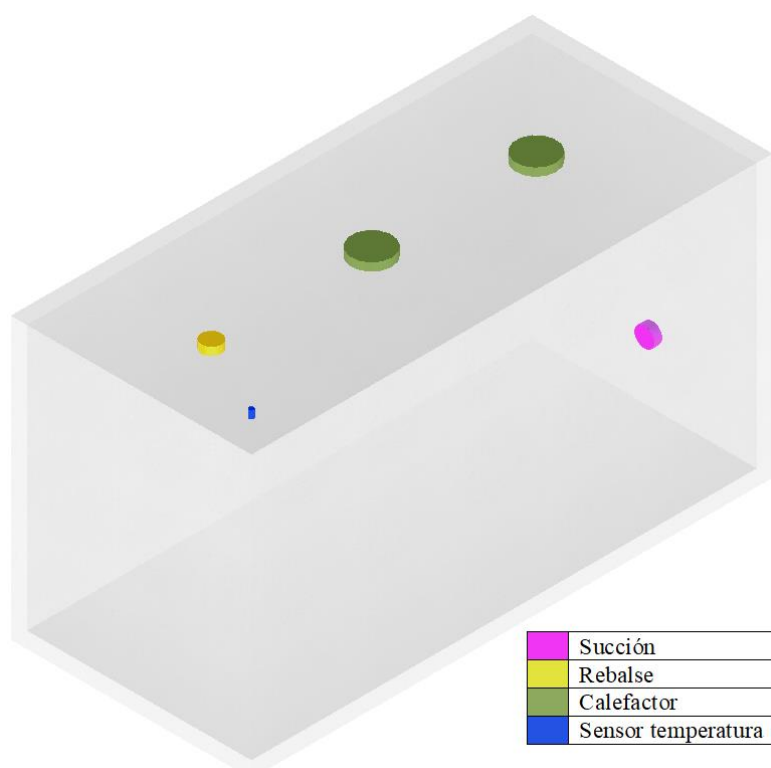


Figura 7.4 Ubicación de equipos módulo de pre-operación

Con relación a la manufactura del estanque, la empresa encargada de realizar esta tarea corresponde a la empresa Metplas, los cuales elaboran el estanque a partir de una matriz de fabricación en dos fases. La primera consiste en una barrera química forjada con una resina vinilister y fibra de vidrio. La segunda fase consiste en una barrera estructural elaborada en plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV o FRP). Además, para poder desmoldar la pieza desde la matriz es necesario contar con un gradiente del 3% en sus paredes laterales manteniendo las medidas originales en la base y aumentando a medida que crece. Por último, para facilitar el acceso al interior del estanque, la empresa recomienda la fabricación de la pared superior desmontable. Para ello se requiere incluir en el diseño una pestaña en todo el contorno superior del estanque para poder incluir un sello de empaquetadura de teflón expandido de 3,2 mm de espesor y fijar la tapa mediante 24 pernos de acero inoxidable M8 de 40 mm de largo utilizando tuercas y golillas aptas para dichos pernos. La figura 7.5 corresponde al modelo del estanque incluyendo la modificación sugerida por Metplas.

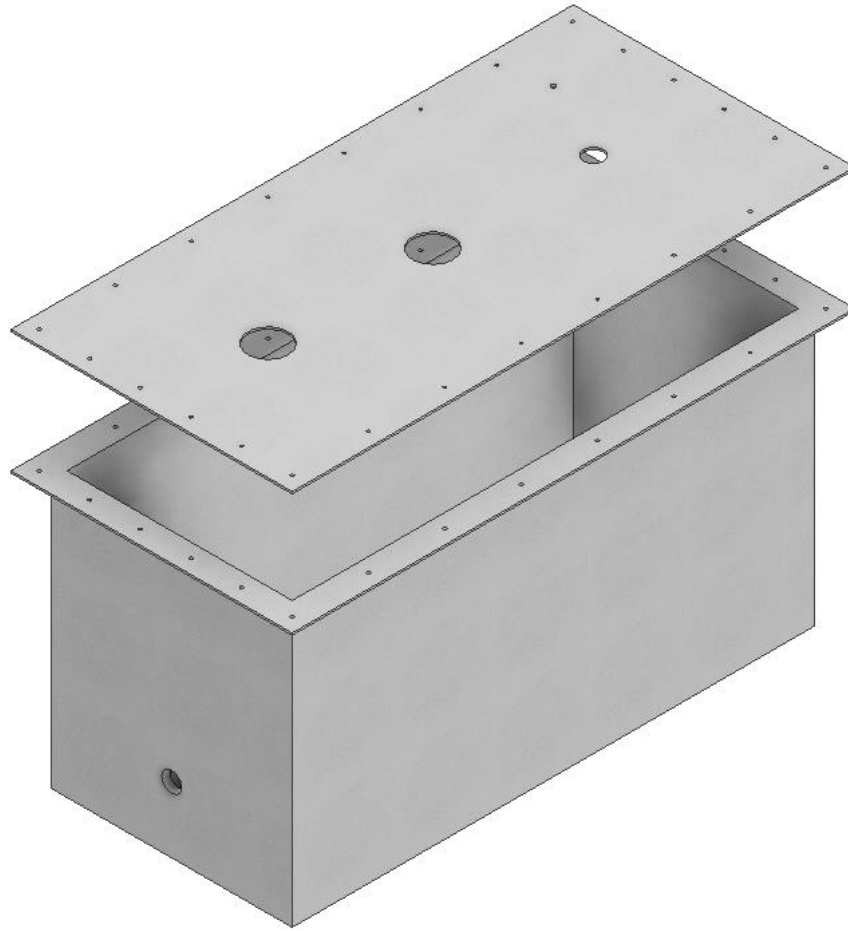


Figura 7.5 Estanque de almacenamiento con tapa removible

Para la selección del calefactor, se debe considerar la potencia mínima necesaria para calentar el electrolito dentro del estanque, cabe recordar que en la celda electrolítica el fluido debe tener una temperatura de 43 °C. Para calcular la potencia necesaria para calentar el electrolito se utiliza la fórmula:

$$P = \frac{C_e \times m \times \Delta T}{t} \times FS \quad (4.1)$$

Donde,

P : potencia requerida en W

C_e : calor específico del fluido en $\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$

M : masa del fluido en kg

ΔT : (temperatura final requerida – temperatura inicial del fluido) en °C

T : tiempo dispuesto para calentar el fluido en segundos

FS : factor de seguridad aplicado

El electrolito de trabajo posee un $C_e = 3,56 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$. Además, el valor de la masa se estima de la densidad y el volumen del fluido. Estos poseen valores de $\rho = 1,12 \text{ kg/dm}^3$ y $V = 550$ litros respectivamente. A partir de estos se conoce que la masa de trabajo es $m = 616 \text{ kg}$.

Se considera una temperatura inicial $T_i = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, considerando la temperatura ambiente de una temporada fría. Y una temperatura final $T_o = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, considerando las pérdidas de temperaturas que puede tener el fluido en el trayecto desde el estanque a la celda. Además, se consideran 24 horas para calentar el electrolito, esto es equivalente a 86400 segundos. Finalmente, se aplicará un factor de seguridad de 20%, valor comúnmente utilizado en este tipo de industria con el objetivo de aminorar errores entre el sistema calculado y el sistema real.

A partir de los datos entregados se calcula la potencia requerida a partir de la ecuación (4.1) como:

$$P = \frac{3,56 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}} \times 616 \text{ kg} \times (50\text{ }^{\circ}\text{C} - 5\text{ }^{\circ}\text{C})}{86400 \text{ s}} \times 1,2$$

$$P = 1,37 \text{ kW}$$

Para asegurar una buena calefacción del fluido y con el objetivo de asegurar una temperatura homogénea, se utilizarán dos resistencias de inmersión con 1000 W de potencia cada una, con una potencia total de 2000W, valor sobredimensionado con relación al calculado. Según especificaciones del fabricante, para la sujeción, los calefactores cuentan con 4 pestañas ubicadas en la base del controlador (según lo expuesto en el capítulo anterior se ubica por fuera del estanque). Para fijar las pestañas se diseña en acrílico de 8 mm de espesor un anillo que se ubicara por sobre la tapa del estanque de almacenamiento. En esta oportunidad se deben montar dos de estos anillos por cada calefactor según el largo de las pestañas, para ello se utiliza cemento 16 para pegar las caras de los anillos acrílicos. La figura 7.6 corresponde al diseño de uno de estos anillos.

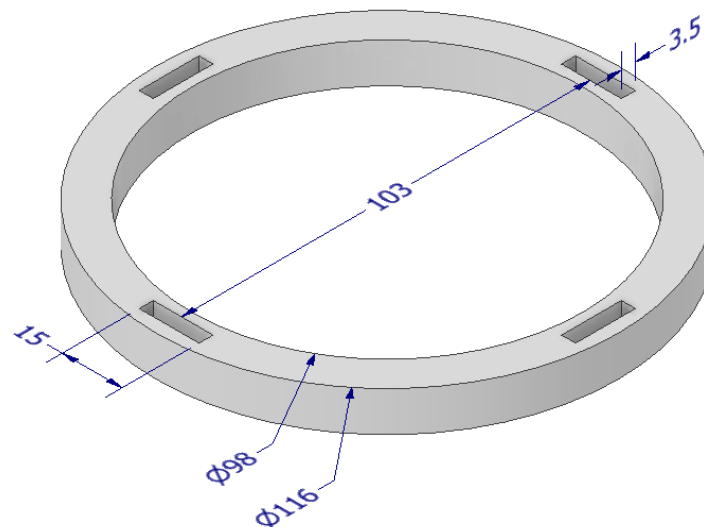


Figura 7.6 Anillo acrílico para sujeción de los calefactores.

Por último, como se mencionó anteriormente, para la instalación del sensor de temperatura el estanque cuenta con el orificio necesario para realizar el montaje de la vaina protectora en la cual se insertará el bulbo con una película de pasta térmica para mejorar la conductividad

entre ambos metales. Además, se realizará la conexión al visualizador digital de la misma manera descrita en la configuración del módulo de control. Ambos visualizadores se conectarán a la corriente a través de un solo cable y enchufe domiciliario.

7.3. Configuración módulo de electroobtención

La fabricación de la celda electrolítica, al igual que el estanque de almacenamiento, será manufacturado por la empresa Metplas. Y al igual que en el caso anterior, se debe fabricar con una pendiente del 3% en sus paredes laterales para facilitar el proceso de desmolde. Las medidas del diseño se mantendrán en la base y aumentarán hacia arriba. Será fabricada en plástico reforzado con fibra de vidrio y contará con una barrera química de resina de poliéster vinilester, usada ampliamente en la construcción de estanques que contienen productos corrosivos y una barrera estructural de resina de poliéster ortoftálica de mediana reactividad.

Con relación a las tuberías para recircular el electrolito, se seleccionan tuberías de PVC hidráulico PN10 con diámetro 50 mm, en función al diámetro de manguera de la bomba seleccionada. Este tipo de tuberías posee buena resistencia a la corrosión y al golpe de ariete, bajas pérdidas de presión y conserva sus propiedades mecánicas hasta los 60° C, además de ser económico, abundante en el mercado y tener excelentes resultados en las pruebas a escala laboratorio. Para la construcción del piping se considera utilizar la menor cantidad de fitting, los que generan resistencia a la circulación del flujo y se identifican tres sectores a componer: desde el estanque de almacenamiento hasta la bomba, desde la bomba a la celda electrolítica y el retorno desde la celda hasta el estanque, cabe señalar que según requerimientos de la bomba tanto la succión como la descarga deben ser rectas, es decir, se deben evitar curvas y codos y debe contar con una distancia mínima de 60 cm desde el estanque hasta la bomba. La cantidad de tuberías y fitting destinados para cada tramo se especifican a continuación.

- (i) Succión estanque – bomba:
 - 70 cm de tubería 50 mm
 - 1 salida de estanque a presión 50 mm
 - 1 válvula de bola 50 mm
 - 1 brida PVC 50 mm
- (ii) Descarga bomba – celda:
 - 465 cm de tubería 50 mm
 - 1 brida PVC 50 mm
 - 1 válvula de bola 50 mm
 - 8 codos 90° 50 mm
 - 1 tee 50 mm
 - 2 tapas 50 mm
- (iii) Retorno celda – estanque:
 - 140 cm de tubería
 - 2 salida estanque a presión 50 mm
 - 1 codo 90°

- 1 válvula de bola
- 1 unión americana 50 mm

La figura 7.7 corresponde a una representación de la posición de las tuberías en el banco de pruebas, donde se pueden identificar los 3 sectores descritos anteriormente.

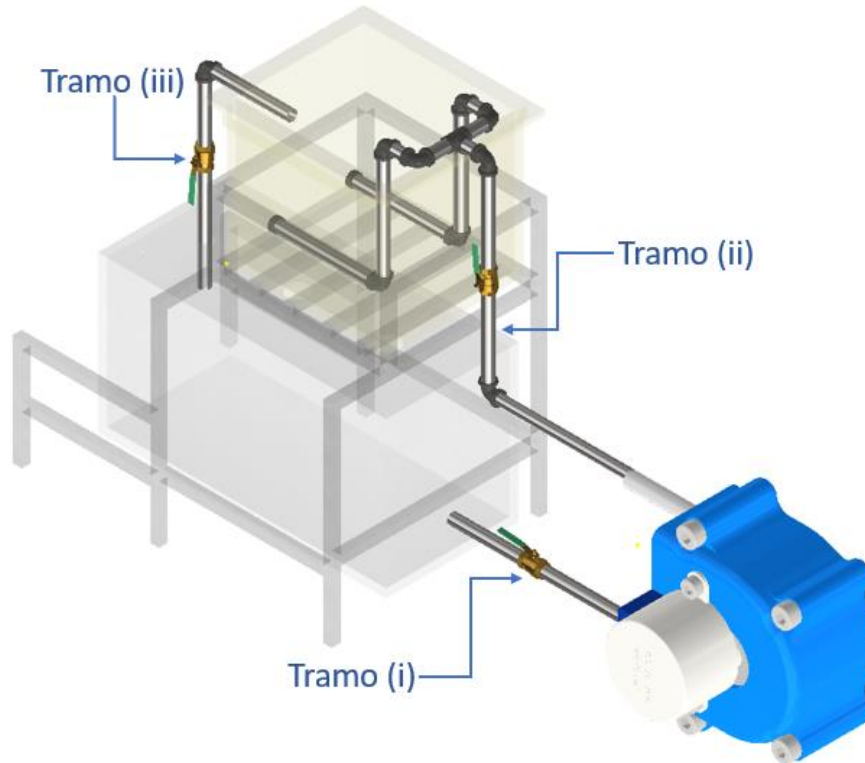


Figura 7.7 Modelo piping planta

Además, para mejorar la deposición de cobre, el electrolito entrará a la celda a través de un sistema tipo colector ubicado en el último segmento de tuberías del tramo (ii) (2 tuberías horizontales). Esto consiste en perforaciones de 5 mm de diámetro equidistantes entre si a 20 mm de distancia con un total de 20 agujeros por tubería. La distancia entre los agujeros de una tubería a la otra es de 33 centímetros. La figura 7.8 muestra el sistema utilizado para la entrada del flujo a la celda.

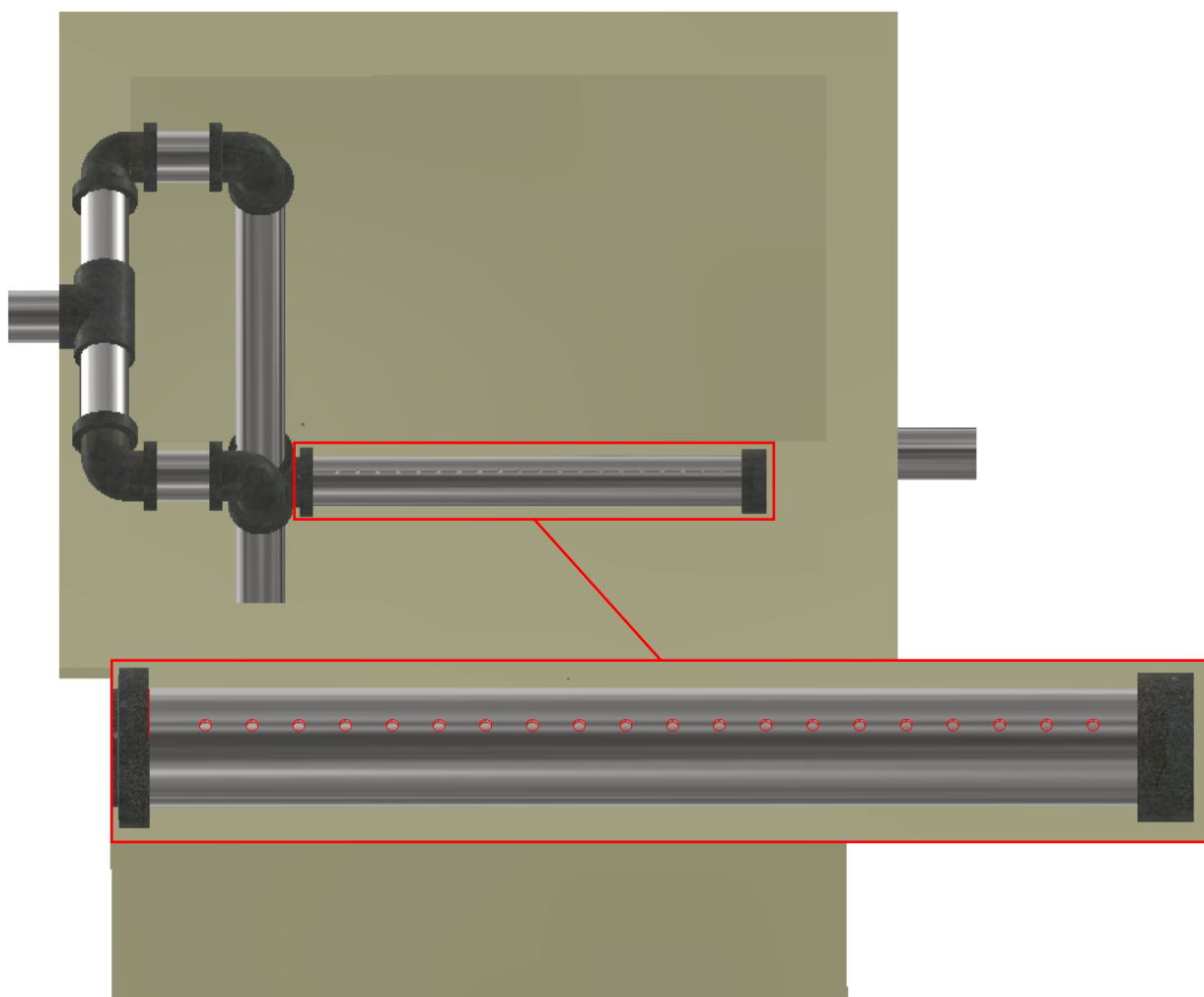


Figura 7.8 Sistema de entrada de flujo a la celda

Para la unión con las tuberías, la bomba cuenta con una brida de acero inoxidable 316L con diámetro interior de 50 mm, diámetro exterior de 80 mm y 4 perforaciones para perno, tanto en la succión como en la descarga. Por lo tanto, en el fitting necesario se contabiliza la adquisición de 2 flanges con manguito para poder introducir las tuberías (figura 7.9) y que cumplan con las características necesarias para lograr la unión bridada. Se debe contar además con sellos de empaquetadura, para evitar filtraciones en la unión.



Figura 7.9 Flange de PVC con manguito

Por otro lado, para la correcta operación de la bomba, esta debe ser anclada al suelo, debido a los picos de presión con los que funcionan las bombas peristálticas. Este modelo cuenta con un marco de sujeción con 4 perforaciones al suelo. Para esto se utilizarán pernos de anclaje de $\frac{3}{4}$ in de diámetro y 5 $\frac{1}{2}$ in de largo. Además, para realizar la labor de perforación se debe contar con un rotomartillo y una broca con toma SDS de 20 mm de diámetro.

Con relación a la conexión eléctrica de la bomba, se requiere de un conector industrial trifásico y una caja de control eléctrico para la puesta en marcha, dicha caja debe contar con un contactor para abrir y cerrar el circuito eléctrico según sea necesario (encender y apagar bomba), además debe contar con los aparatos de control para el sensor de nivel nombrados anteriormente, los cuales deben contar con la capacidad para accionar y detener la bomba.

7.3.1. Circuito eléctrico

Para configurar el circuito eléctrico se debe tener en consideración la implicancia de la corriente eléctrica en el proceso de electroobtención. Como se mencionó en el capítulo 3, para que ocurra la electrólisis los cátodos deben estar conectados a un polo negativo, mientras que los ánodos deben estar conectados al polo positivo, de esta forma se genera un flujo de iones de cobre hacia la superficie de los cátodos. La figura 7.10.a,b,c representa diferentes configuraciones del mismo proceso, según cuantos electrodos se utilicen en la prueba. En la figura 7.10.d se observa el diagrama eléctrico de la configuración representada en la figura 7.10.c, que corresponde a la configuración máxima permitida para el diseño del banco de pruebas. Esta configuración eléctrica se diseñó en función a la información entregada en las figuras 3.2 y 3.4.

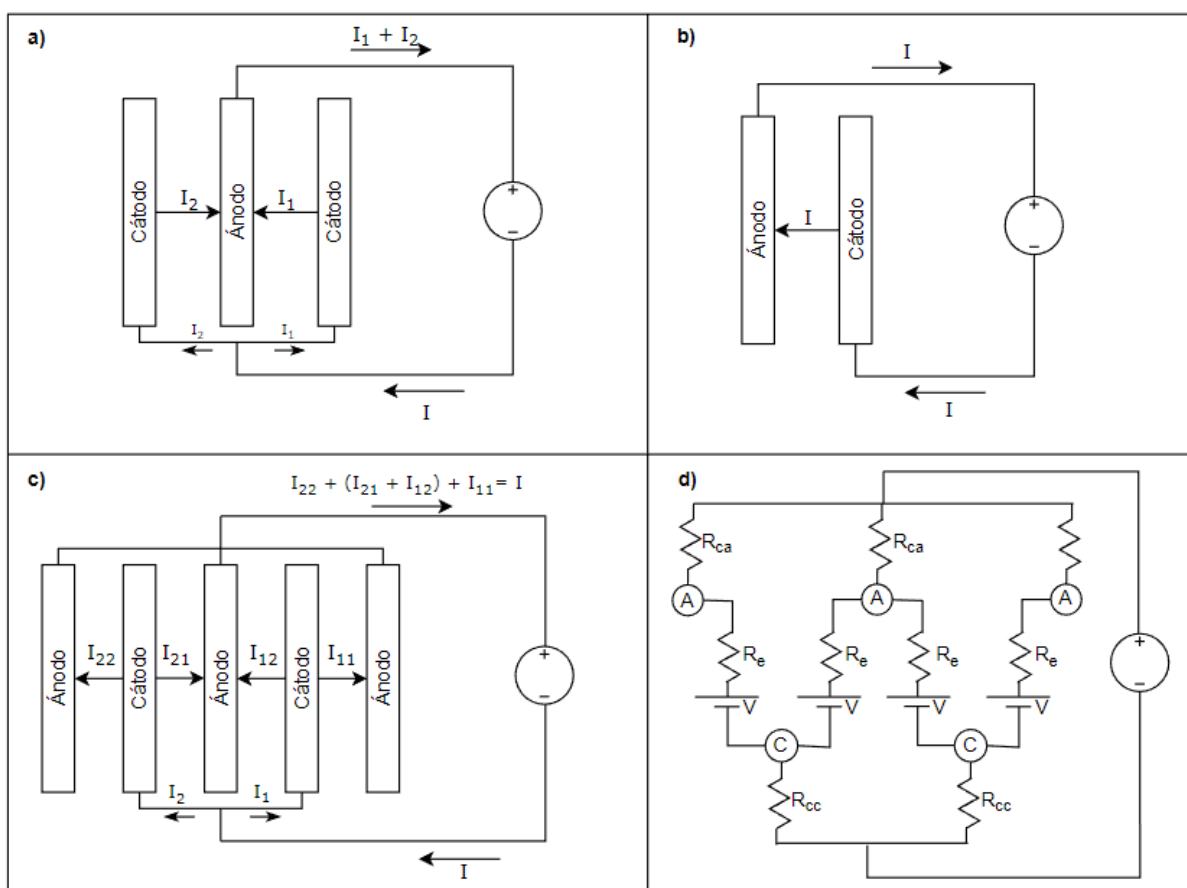


Figura 7.10. Configuración eléctrica de electrodos. a) Utilización de 1 ánodo para cosechar en solo una cara de 2 cátodos. b) Utilización de 1 ánodo para cosechar en una cara de 1 cátodo. c) Utilización de 3 ánodos para cosechar en ambas caras de 2 cátodos. d) Diagrama eléctrico de (c)

Para realizar las conexiones de manera ordenada e independiente se utilizará un sistema de conexiones por cable. Para ello, se dispondrá de la fuente de poder, una pletina de cobre y las barras de cobre de los electrodos, unidos unos a otros mediante cables eléctricos con terminal de ojal por ambos extremos. La pletina, ubicada en la solapa del alero superior de la celda electrolítica, tiene la función de actuar como puente eléctrico entre la fuente y los electrodos, de esta forma es posible desconectar un electrodo del circuito sin requerir desmontarlo de la celda, solo quitando el cable que conecta la pletina y el respectivo electrodo. La figura 7.11 corresponde al diseño de la pletina de cobre, esta cuenta en sus extremos con agujeros para realizar la conexión a la fuente de poder. Aunque dicha conexión se debe hacer solo por uno de los extremos de la pletina se ha decidido realizar un diseño simétrico con el objetivo de permitir al usuario instalar la fuente de poder en el extremo que desee.

Tanto los agujeros para la conexión a la fuente de poder (1), como los agujeros para la conexión hacia los electrodos (3) poseen un diámetro de 6,5 mm y se dispondrá de pernos hexagonales de bronce con medidas de $\frac{1}{4} \times \frac{3}{4}$, hilo UNC para realizar la sujeción de los cables, complementados por golillas planas y pernos hexagonales G2 cincados de $\frac{1}{4}$ ". Se debe considerar un conjunto de 2 pernos por cada conexión cableada.

Los agujeros de sujeción a la celda (2) poseen un diámetro de 8 mm y se dispondrá de pernos hexagonales cincados M8-1.25 x 60 calidad 8.8, tuercas hexagonales cincadas M8-1.25 y golillas planas cincadas de 8 mm. Se deben considerar 3 juegos de pernos por cada pletina. El plano de la pieza puede encontrarse en el anexo B.

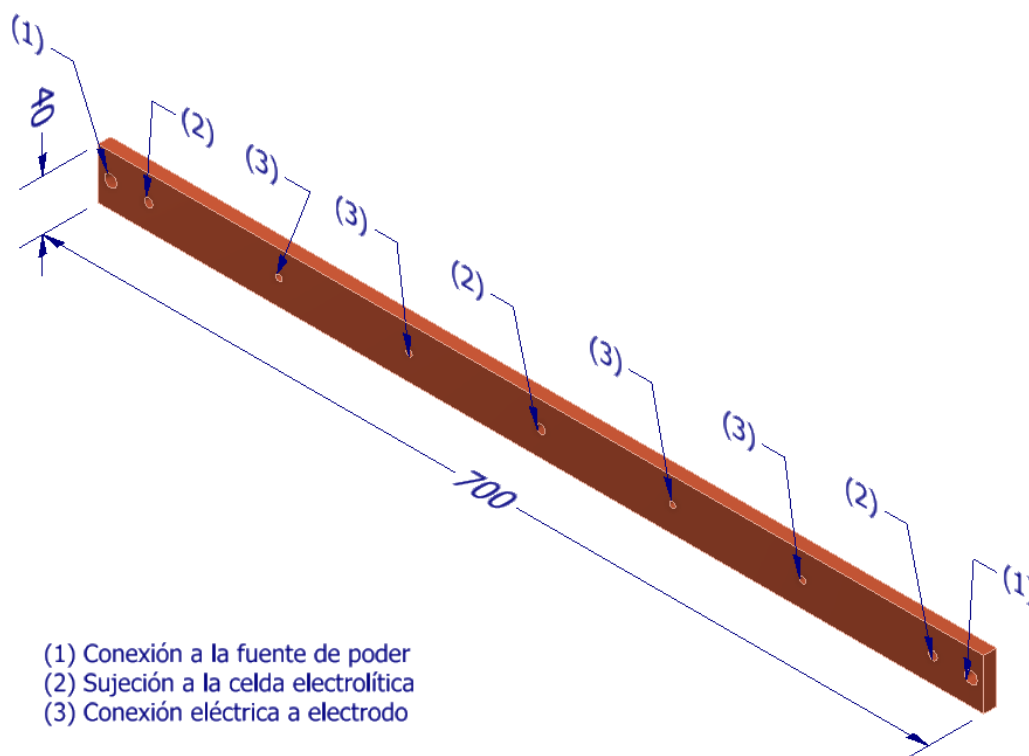


Figura 7.11 Pletina de cobre para puente eléctrico

7.3.2. Fuente de poder

Según la información entregada en el capítulo anterior en cuanto a los rangos de operación de la fuente de poder a escala laboratorio, se hace una primera estimación geométrica para determinar los rangos de operación de la fuente de poder a escala semiindustrial. Se considera que el volumen de operación aumenta 20 veces entre una escala y la otra, mientras que el área efectiva de los electrodos aumenta 15 veces. Por lo que se calcula que, en iguales condiciones de operación, la corriente podría alcanzar valores de 16 A aproximadamente. Para una instancia inicial se utilizará una fuente de poder disponible actualmente en el laboratorio marca QJE modelo PS3020 con rangos de operación de 0 a 20 A de corriente continua de salida y 0 a 30 V de voltaje de salida. Por otro lado, se seleccionan cables con un rango de operación de 0 a 60 A, para asegurar la mayor eficiencia de corriente y en caso de requerir una fuente de poder con mayor rango de operación en otro tipo de operaciones del banco de pruebas. Los cables se fijarán a los bornes de la fuente de poder y a las piezas de cobre mediante terminales tipo ojal de bronce estañado aptos para el cableado seleccionado. En la figura 7.12 se puede apreciar una representación de la conexión de un cátodo, desde el borne negativo de la fuente de poder hasta el electrodo. En la imagen también se pueden apreciar separadores plásticos insertados en los pernos de sujeción de la pletina, estos cumplirán la función de aislar eléctricamente la pletina del estanque.

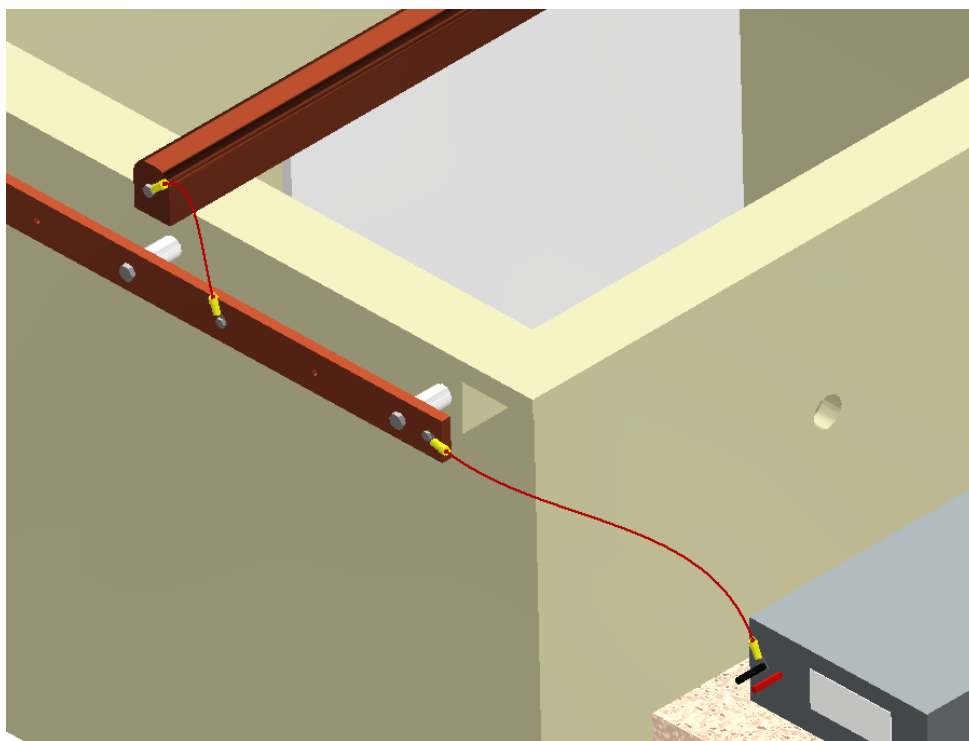


Figura 7.12 Diseño suministro eléctrico

7.3.3. Sistema de izaje

Para el izaje de los electrodos, se debe considerar el peso y dimensionamiento de los elementos a levantar. En esta oportunidad corresponde al montaje de ánodos de plomo, ánodos nanoestructurados fabricados en base a materiales poliméricos y cátodos de acero inoxidable limpios. Y el desmontaje de los ánodos al finalizar el proceso y cátodos con cobre cosechado. Cabe mencionar que tanto en el montaje como en el desmontaje se izarán los elementos de a uno.

Los ánodos de plomo poseen peso no superior a 50 kg. Por otro lado, el peso de los ánodos nanoestructurados ronda los 5 kg. Los cátodos de acero inoxidable limpios pesan alrededor de 13 kg. Y, para calcular el peso máximo aproximado de cobre cosechado por estos se considera que en EW industrial los cátodos de 1m² cosechan alrededor de 40 kg de cobre.

Por lo tanto, el peso máximo estimado de los cátodos cosechados corresponde a:

$$M_{total} = 13 \text{ kg} + \left[40 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \times 0,25 \text{ m}^2 \right] = 23 \text{ kg}$$

Finalmente, todos los electrodos poseen una superficie de 50 x 50 cm² y una barra de cobre de 70 cm de largo y 5 cm de alto. En tanto, las barras de los ánodos nanoestructurados poseen una sujeción tipo ojal en la cara superior para facilitar el izaje, los ánodos de plomo y los cátodos no cuentan con ningún tipo de sujeción.

7.4. Configuración módulo de soporte

Para el dimensionamiento de la estructura de soporte se deben tener en cuenta las medidas de los estanques que serán soportados y protegidos por esta. Según requerimientos de fabricación las de los estanques, fabricados a partir de matrices, deben contar con un ángulo de 3° para facilitar las maniobras de desmolde. Dicha condición debe ser considerado para cumplir con los requerimientos de diseño de la estructura y serán analizados a continuación.

Por un lado, para dimensionar la parte superior de la estructura se deben considerar las dimensiones de la celda electrolítica. La estructura contará con travesaños que tendrán como función proteger y dar estabilidad a las paredes de la celda, por lo que se espera que este calce de manera justa dentro de los largueros, los cuales estarán ubicados a 300 mm del fondo de la celda y serán el punto más alto de la estructura. En la figura 7.13.A se pueden observar las dimensiones en cuestión.

En la parte inferior de la estructura, por debajo de la celda, se encontrará el estanque de almacenamiento. La estructura debe estar diseñada para contener en su totalidad dicho estanque, por lo que se deben considerar las dimensiones de la parte superior del estanque, considerando el ángulo de fabricación y las pestañas añadidas para fijar la tapa, las cuales se pueden observar en la figura 7.13.B.

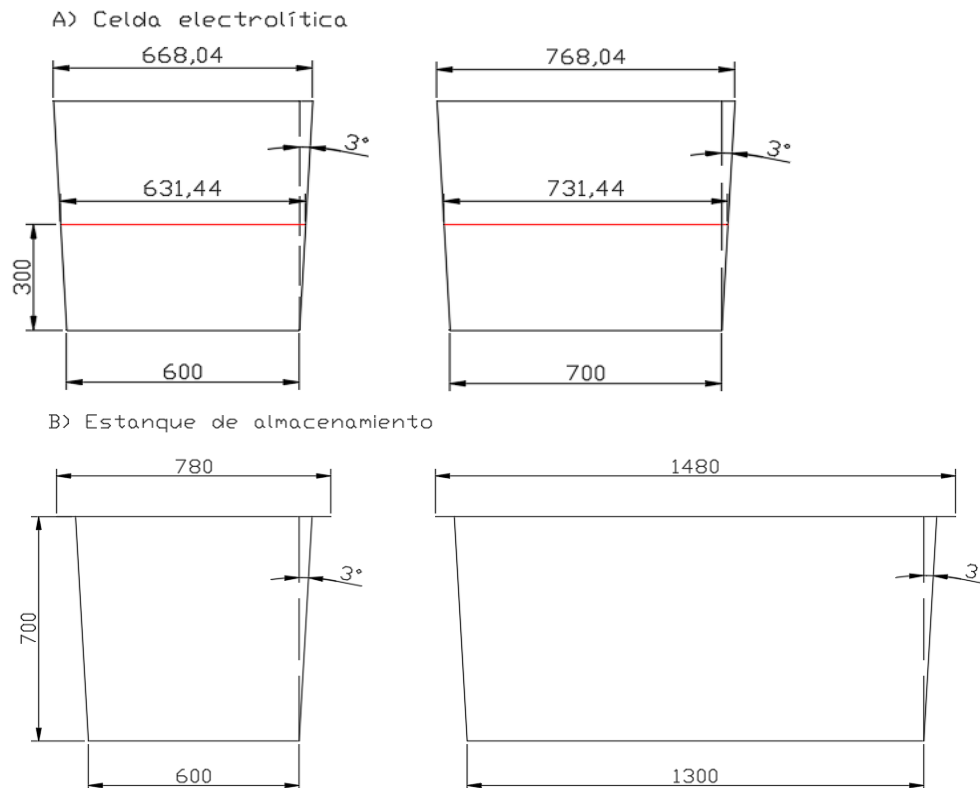


Figura 7.13 Planos frontal y lateral A) Celda electrolítica B) Estanque de almacenamiento

Bajo estas consideraciones se considera óptimo el diseño estimado en la figura 6.12 y cuyas dimensiones finales se pueden apreciar en el plano presente en el Anexo B. Por otro lado, se

baraja la utilización de perfiles tubulares cuadrados de 40 x 40 x 2 mm en acero estructural para la totalidad del armazón. A este diseño se le realiza un análisis de encuadre en el Software Autocad Inventor para determinar si es capaz de soportar la carga ejercida por la celda electrolítica llena de electrolito.

Para ello se debe determinar el peso de la celda y del electrolito por separado. En el caso de la celda electrolítica, esta será fabricada en fibra de vidrio y recubierta con resina palatal A-430, se calculará la masa utilizando el volumen de cada una de las paredes y las densidades de ambos materiales ($\rho_{\text{fibra}} = 2500 \text{ kg/m}^3$ y $\rho_{\text{resina}} = 1150 \text{ kg/m}^3$), obteniendo un valor total de $M_{\text{celda}} = 64,3 \text{ kg}$. La memoria de cálculo se encuentra en el Anexo A. En cuanto al peso del electrolito, este posee una densidad de $\rho_{\text{electrolito}} = 1118 \text{ kg/m}^3$ y se sabe que el volumen contenido es de 180 litros, a partir de esto se obtiene un peso $M_{\text{electrolito}} = 201,24 \text{ kg}$. Por lo tanto el peso total del conjunto es de $M_{\text{total}} = 265,44 \text{ kg}$, lo que equivale a una carga $P_{\text{total}} = 2604 \text{ N}$. Dicha carga se distribuye en los 4 perfiles utilizados como base para sostener la celda (ver figura 6.12), por lo tanto se considera una carga $P_1 = 651 \text{ N}$ por cada uno de estos perfiles. No se consideran más fuerzas sobre la estructura.

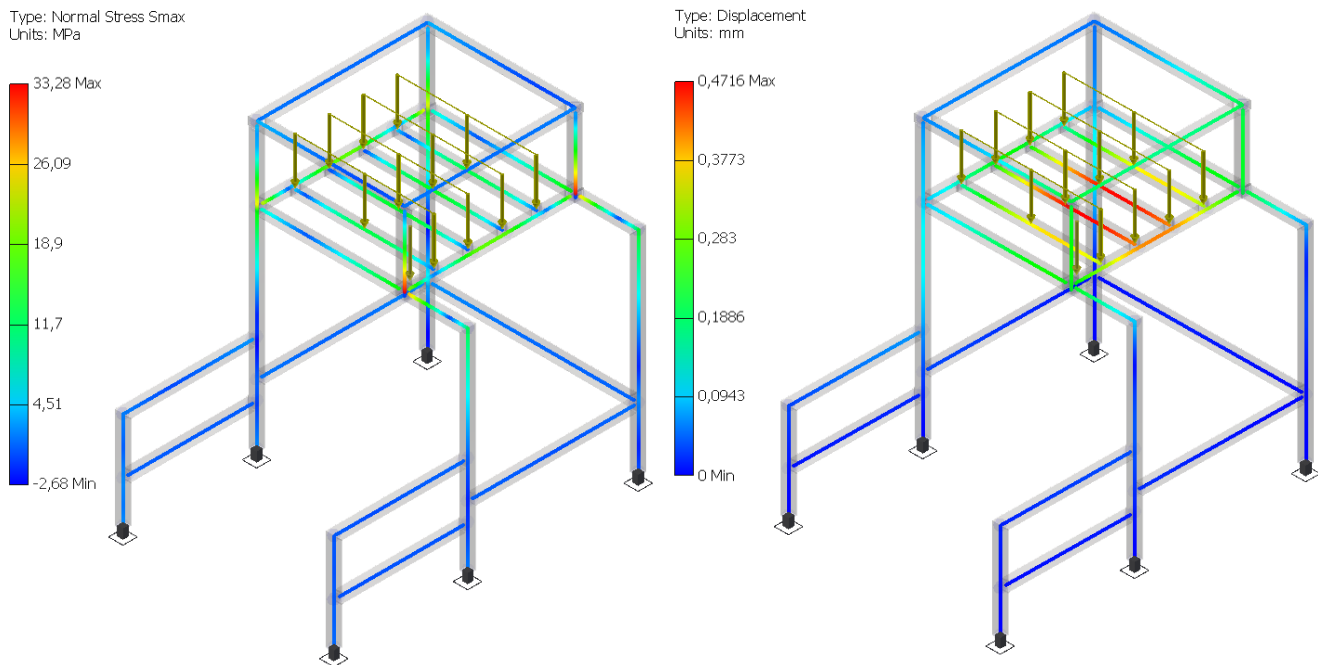


Figura 7.14 A) Esfuerzo normal máximo B) Desplazamiento por deflexión

A partir de los análisis realizados y según se observa en la figura 7.14.A., el esfuerzo máximo al que está sometida la estructura es de 33,28 MPa. Los perfiles de acero estructural poseen un límite de fluencia alrededor de 250 MPa, esto quiere decir que la estructura no posee riesgos de sufrir deformaciones plásticas. Por otro lado, el desplazamiento máximo al que podrían verse sometida la estructura es de 0,47 mm (figura 7.14.B), dentro de su rango elástico, y adicionalmente el análisis entrega que la estructura posee un valor de seguridad cercano a 15, bastante sobredimensionado para la carga solicitada. Con esta información se puede ratificar que el diseño del armazón y los perfiles seleccionados son adecuados para realizar la función.

Una vez fabricada la estructura, esta debe ser recubierta con 2 capas de pintura anticorrosiva para protegerla del medio ácido y posteriormente con 1 capa de esmalte color gris para entregar armonía en dentro del espacio de trabajo. Adicionalmente, se dispondrán regatones de goma en la base de los pilares para proteger el suelo del contacto con el acero.

8. Implementación de banco de pruebas

A diferencia del capítulo anterior, la implementación del banco de pruebas no será descrito en orden modular, si no que en el orden en que se fue realizando dicha implementación. Ya que el orden del proceso responde a necesidades de seguridad, lógica y comodidad.

Debido a la complejidad de la obra, la primera labor en realizarse corresponde a la instalación de salida a los 4 vientos. El ventilador extractor es instalado en el techo del edificio B por la empresa contratista Altrabajos, especialistas en trabajos en altura. Paralelamente se envió a fabricación la celda electrolítica, el estanque de almacenamiento, los calefactores, la campana de extracción y la estructura de soporte, presentes en la figura 8.1.



Figura 8.1 De arriba a abajo e izquierda a derecha: calefactor, celda electrolítica, estanque de almacenamiento, estructura, campana de extracción.

Se inicia la instalación de los diferentes equipos del banco de pruebas con el montaje y pintado de la viga, esta labor es realizada por la empresa construcciones Gijón, que además, instalan inmediatamente el carro trole y el teclé para poner tapas en los extremos de la viga y evitar que el carro pueda salir por los extremos. Simultáneamente, se pinta la estructura de soporte según las especificaciones de diseño con anticorrosivo estructural. Una vez terminado dicho proceso, todas las otras tareas se realizar dentro del laboratorio.

En primer lugar, se instala la estructura, los estanques y la bomba en el espacio destinado para ello, se procede a fijar la bomba al suelo con los pernos de anclaje para iniciar el proceso de construcción del piping (figura 8.2).



Figura 8.2 Instalación del piping

En segundo lugar, se instala la campana de extracción, para ello se hacen necesarios 3 fitting de reducción: 110 mm x 125 mm, 125 mm x 160 mm y 160 mm x 200 mm, únicos disponibles en el mercado al momento de realizar la compra. Se utiliza pegamento de tubería para fijar cada sección y cinta de aluminio para asegurar las uniones. Se utiliza piola para sostener la campana tanto en el tecele como en posición de descanso. Y se cuelga un mosquetón en la viga para sostener la campana en dicha posición. Este mosquetón también se utilizará para afirmar las cadenas del tecele cuando no se estén utilizando. En la figura 8.3 se puede observar el resultado de la instalación.



Figura 8.3 Instalación campana extractora

El siguiente paso es realizar las instalaciones eléctricas necesarias para los equipos eléctricos, en este caso se debe hacer la conexión trifásica de la bomba y las 2 conexiones monofásicas de los calefactores. El laboratorio ya cuenta con las conexiones eléctricas domiciliarias para el resto de los equipos que necesitan corriente. La caja de control de la bomba se instala al lado derecho del banco de pruebas (cercano a la bomba), mientras que los enchufes monofásicos se instalan por el lado izquierdo, ver figura 8.4.



Figura 8.4 Conexiones eléctricas monofásicas y trifásicas

En este punto ya es posible realizar las primeras pruebas de funcionamiento utilizando agua como fluido de trabajo, estas pruebas son estrictamente necesarias debido a la naturaleza del electrolito y la cantidad de fluido de trabajo utilizado por el banco de pruebas. Estas pruebas iniciales tienen como objetivo determinar la calidad de las uniones entre tuberías y el comportamiento del retorno desde la celda hacia el estanque inferior. Además, se instalan los calefactores para revisar su funcionamiento y estudiar el comportamiento del sistema al elevar la temperatura (figura 8.5). Para realizar esta instalación se saca la tapa del estanque inferior quitando los pernos que la sujetan.

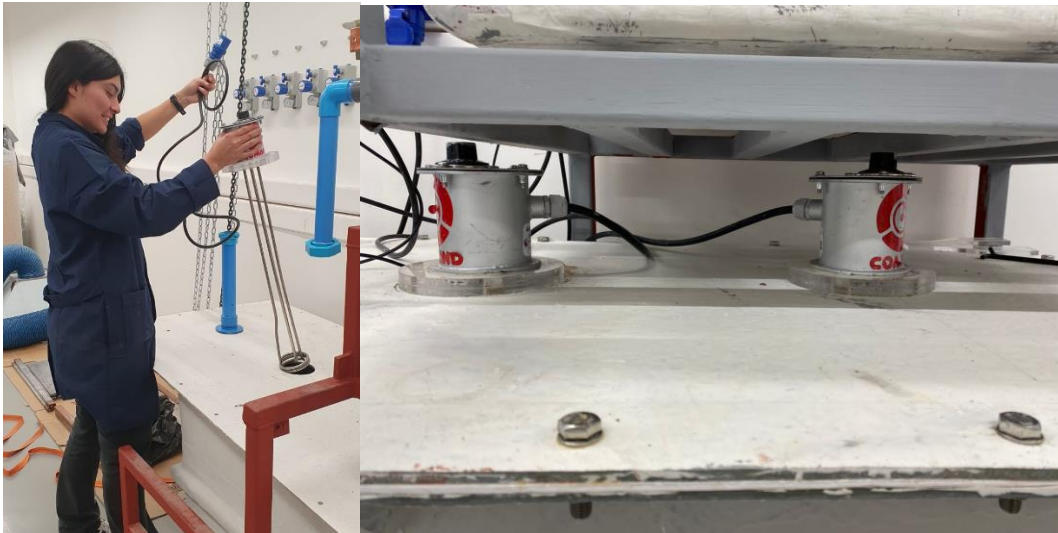


Figura 8.5 Instalación de calefactores

A continuación, se realiza la instalación de los elementos de instrumentación, para ello un técnico especialista realiza las conexiones eléctricas de los sensores de temperatura y sensores de nivel. Cada sensor de temperatura se conecta por un cordón simple a su correspondiente visualizador digital, los que se asientan en la caja acrílica y se conectan, ambos, a un mismo cordón de alimentación eléctrica. En la figura 8.6 se puede observar el frontis y reverso de la caja acrílica y ambos sensores instalados.



Figura 8.6 Sensores de temperatura

El sensor de nivel se sitúa en el mismo espacio físico que el sensor de temperatura de la celda electrolítica, para ello se le adiciona al sensor una pequeña plataforma acrílica para sostenerlo. Las conexiones eléctricas y los equipos de electrónica requeridos por este sistema se ubican dentro de la caja de control de la bomba como se observa en la figura 8.7, donde se enumeran los equipos electrónicos. Los equipos 2 y 3 corresponden a los necesarios para llevar a cabo la función del sensor. El equipo 4 corresponde al contactor, en el cual es un tipo de interruptor automático que controla la bomba, por lo tanto, en este se conectan los cables de alimentación trifásica y de control provenientes de los equipos del sensor. Por último, el equipo 1 corresponde a un interruptor automático, presente como medida preventiva ante variaciones de corriente.

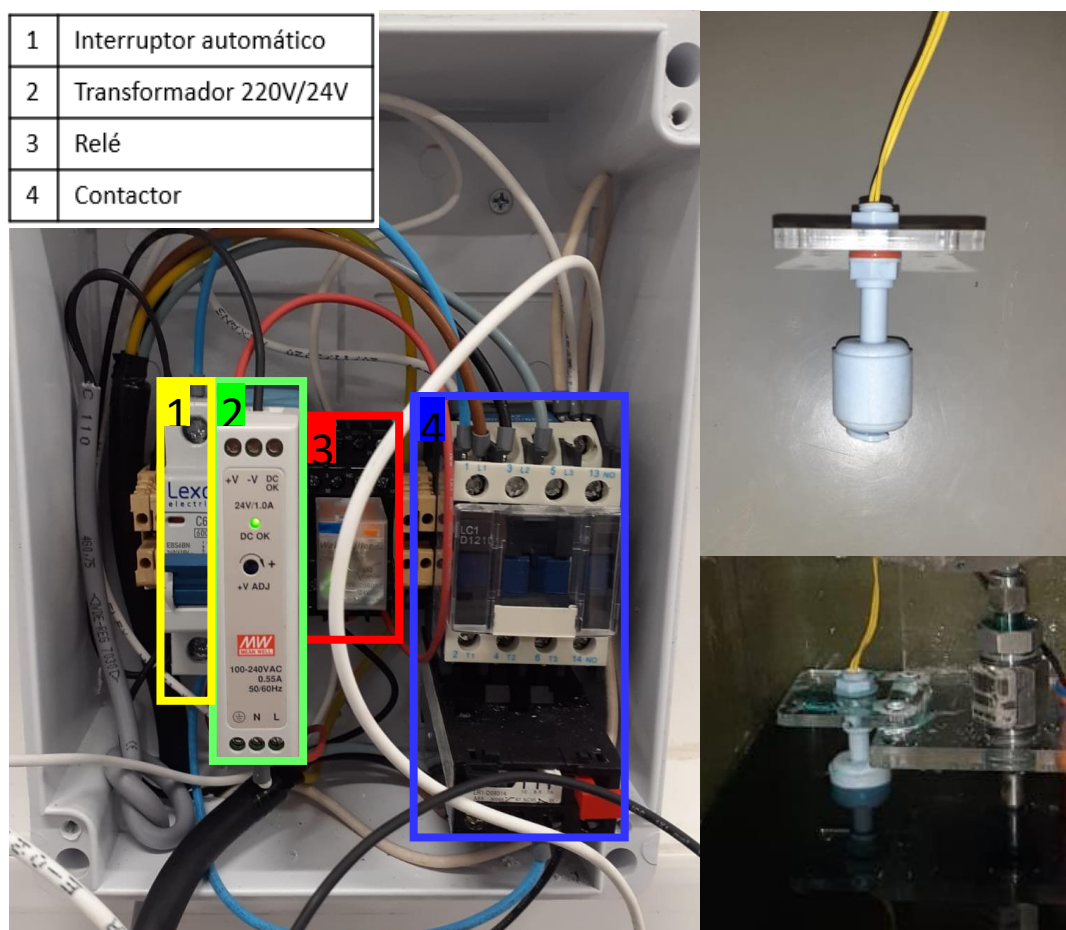


Figura 8.7 Sensor de nivel

En este punto se debe realizar una segunda prueba con agua, esta vez bajo las mismas condiciones de operación que se buscan alcanzar en las pruebas reales con electrolito, es decir, trabajar durante varios días de manera continua. Esto es importante para asegurar el correcto funcionamiento del sensor de nivel, que tiene como responsabilidad prevenir rebalses de electrolito y asegurar la estabilidad de la corriente eléctrica en todos los equipos que la requieren.

Una vez finalizadas las pruebas se procede a vaciar los estanques y volverlos a llenar con electrolito, para esto se empleó una bomba peristáltica pequeña perteneciente al

Departamento de Química de la Universidad. Se dispone de 600 litros de electrolito real facilitado por la empresa Inppamet en 3 tambores de 200 litros cada uno. En la figura 8.8 se puede observar el proceso de llenado, el cual se hizo únicamente hacia el estanque de almacenamiento y posteriormente por bombeo, hacia la celda.



Figura 8.8 Trasvasije de electrolito

Finalmente, se puede realizar la instalación de los electrodos y de las piezas y equipos que componen la alimentación de corriente continua según las especificaciones detalladas en la fase del diseño. En la figura 8.9 se puede observar el izaje de un cátodo de acero inoxidable, mientras que en la figura 8.10 se encuentran las conexiones eléctricas desde la fuente de poder hasta los electrodos. Por último, en la figura 8.11 se puede apreciar la instalación final del banco de pruebas con todos los elementos introducidos durante las fases del diseño.

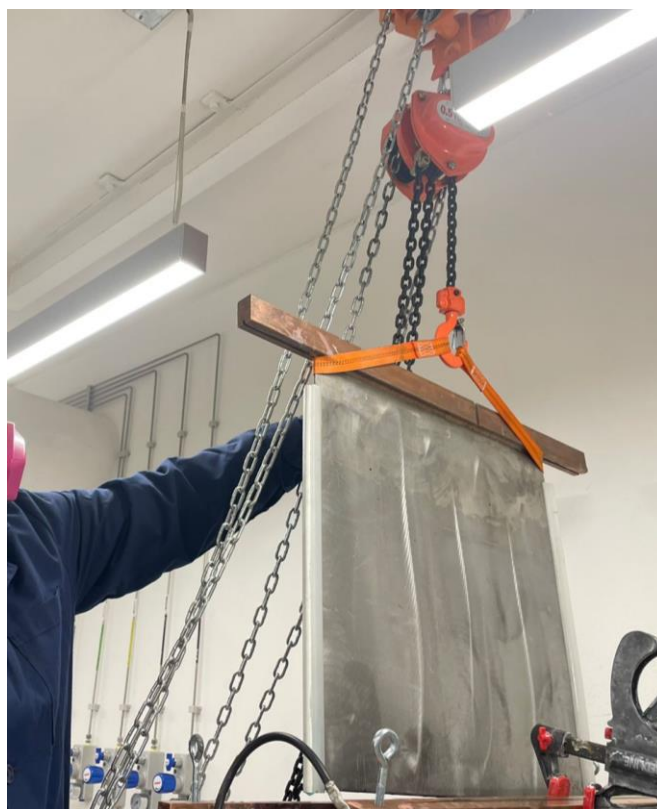


Figura 8.9 Montaje de cátodo



Figura 8.10 Conexiones eléctricas



Figura 8.11 Banco de pruebas de EW escala semi-industrial

9. Conclusiones y recomendaciones

Como resultado la memoria de título “Diseño e implementación de una planta piloto semiindustrial de electroobtención de cobre” se obtiene como resultado la implementación de un banco de pruebas escala semiindustrial de electroobtención, lo cual se logró mediante la utilización de una metodología de diseño de sistemas mecánicos, definiendo el problema a resolver en términos de objetivos, restricciones y funciones, permitiendo sistematizar los pasos a seguir para orientar el diseño de manera adecuada.

A través de los estudios previos a los pasos de diseño fue posible conocer los principios de operación de la electroobtención y los mecanismos utilizados industrialmente para llevar a cabo el proceso, de esta manera fue posible comprender la implicancia de diferentes parámetros en su eficiencia y eficacia. En esta etapa la configuración del circuito de alimentación eléctrica toma mayor relevancia debido al protagonismo que posee y la importancia que debe asignarse a la hora de generar el diseño.

Fue posible incluir experiencias de la etapa anterior del proyecto, donde se fabricó una planta a escala laboratorio; para lograr un diseño seguro, recogiendo las falencias de fabricación de dicho modelo. También se consideró como una buena referencia inicial al ser un modelo funcional en el cual fue posible cosechar cobre.

Una vez seleccionado el concepto de diseño y elaborada la lista de partes y equipos necesarios para cumplirlo, se realizaron los planos de aquellas piezas que requerían ser fabricadas y se inició con la cotización y selección de los equipos cuyos requerimientos se conocían a cabalidad, se realizó más de una cotización para garantizar la calidad y competitividad de los productos. Además, por solicitud de FONDEF, se realizó 3 cotizaciones como mínimo para aquellos equipos que superaran el valor de \$1.000.000. Con el desarrollo del diseño de detalles fue posible seleccionar y/o fabricar aquellos equipos con mayores requerimientos.

Fue posible implementar la planta con todos los equipos previstos en las etapas de diseño incluyendo modificaciones menores, como la adhesión de una placa acrílica que aislase las pletinas de cobre para la conexión eléctrica y la utilización de abrazaderas para fijar las tuberías a la celda. Se incluyó en el proceso, además, el llenado del estanque de almacenamiento para dejar el banco de pruebas listo para iniciar los ensayos. La cooperación interdepartamental fue indispensable para validar la implementación de diversos equipos, principalmente los referidos a instalaciones eléctricas.

En la fase de operación, una vez iniciadas las pruebas del banco, el sensor de nivel sufrió complicaciones, cuyo origen se desconoce y no cumplió su función de prevenir rebales de electrolito. Para futuras pruebas es necesario configurar dicho subsistema de tal manera que no ocurran fallas. Además, es indispensable realizar pruebas de operación reales con agua previas, esto es utilizando las mismas condiciones y tiempos de operación que la electrólisis para garantizar el correcto funcionamiento de todos los sistemas, principalmente los destinados a la seguridad.

Para una próxima etapa del proyecto se recomienda barajar algunas consideraciones de rediseño. Debido al tipo de funcionamiento de la bomba, el sistema se ve expuesto a

constantes golpes de presión. Al ser un sistema rígido esto puede traer problemas mecánicos a futuro. Además, se pudo apreciar que la rosca de la salida de estanque que conecta el estanque de almacenamiento con la bomba se fue soltando con el tiempo, ocasionando fugas por la empaquetadura. Dentro de las opciones disponibles para solucionar este inconveniente se ha sopesado a priori (1) la instalación de un amortiguador de pulsaciones compatible con la bomba, estos poseen un valor relativamente elevado. (2) La instalación de mangueras en sustitución de una fracción de tubería, tanto en la succión como en la descarga de la bomba ya que al ser de un material flexible tienen la capacidad de absorber las pulsaciones. Esta alternativa es más económica, pero requiere mayor investigación y validación.

10. Referencias

- [1] J. C. Paynter, "Review of Copper Hydrometallurgy.," *J. South African Inst. Min. Metall.*, vol. 74, no. 4, pp. 158–170, 1973.
- [2] Codelco Chile, "Codelco Educa," 2018. <https://www.codelcoeduca.cl/>.
- [3] T. Havlik, "Current situation in copper production," in *Hydrometallurgy: Principles and applications*, First., Cambrige, 2008, pp. 1–16.
- [4] D. W.G, K. M., S. M., and B. K.A., "Hydrometallurgical copper extraction: introduction and leaching," in *Extractive metallurgy of copper*, Fourth edi., 2002, pp. 282–291.
- [5] D. W.G., K. M., S. M., and B. A.K., "Solvent extraction transfer of Cu from leach solution to electrolyte," in *Extractive metallurgy of copper copper*, Fourth edi., 2002, pp. 307–308.
- [6] N. T. Beukes and J. Badenhorst, "Copper electrowinning- theoretical and practical desing," *J. South. African Inst. Min. Metall.*, vol. 109, no. 6, pp. 343–356, 2009, Accessed: Jun. 07, 2021. [Online]. Available: http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2225-62532009000600003.
- [7] "Lo Aguirre, el recuerdo de un hito," *Rev. Minería Chil.*, vol. 294, 2005, [Online]. Available: <https://www.mch.cl/reportajes/lo-aguirre-el-recuerdo-de-un-hito/?revista=72690>.
- [8] Jorge Beckel, *El proceso Hidrometalúrgico de lixiviación en pilas y el desarrollo de la minería cuprífera en Chile*, vol. 3. 2000.
- [9] W. G. Davenport, M. King, S. M., and B. A.K., "Electrowinning," in *Extractive metallurgy of copper*, Fourth edi., Oxford, 2002, pp. 327–336.
- [10] COCHILCO, "Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales," 2020.
- [11] G. Cartagena M., "Hidrometalurgia del cobre," in *Química y metalurgia del cobre*, pp. 161–224.
- [12] P. E. Aqueveque, E. P. Wiechmann, and R. P. Burgos, "Short-circuit detection for electrolytic processes employing optibar intercell bars," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 45, no. 4, pp. 1225–1231, 2009, doi: 10.1109/TIA.2009.2023357.
- [13] E. P. Wiechmann, A. S. Morales, and P. Aqueveque, "Improving productivity and energy efficiency in copper electrowinning plants," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 46, no. 4, pp. 1264–1270, 2010, doi: 10.1109/TIA.2010.2049818.
- [14] Inppamet Ltda., "Inppamet Ánodos," vol. 5, no. 3. pp. 248–253, 2020.
- [15] A. Carracedo R., "Desarrollo de la industria de ánodos de plomo en Chile : El caso de Inppamet Ltda.," UNIVERSIDAD DE CHILE, 2012.
- [16] C. Chibwe, "Investigating the influence of electrolyte composition on electrodeposition in copper electrowinning," Stellenbosch University, 2020.
- [17] S. P. Sandoval, C. J. Clayton, T. G. Robinson, C. J. Zanotti, and M. K. Zanotti, "Anode structure for copper electrowinning," 8,038,855, 2011.
- [18] M. S. Moats, "Energy efficiency of electrowinning," in *Energy Efficiency in the Minerals Industry*, vol. 142, K. Awuah-Offei, Ed. Springer International, 2018, pp. 213–232.
- [19] I. Ivanov *et al.*, "Insoluble anodes used in hydrometallurgy: Part II. Anodic behaviour of lead and lead-alloy anodes," *Hydrometallurgy*, vol. 57, no. 2, pp. 125–139, Sep. 2000, doi: 10.1016/S0304-386X(00)00098-0.

- [20] J. Ipinza, J. P. Ibanez, F. Vergara, and A. Pagliero, “Anodic slimes formation in copper electrowinning,” *Rev. Metal.*, vol. 40, pp. 13–20, 2004, Accessed: Aug. 30, 2022. [Online]. Available: https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:35102054.
- [21] R. Al Shakarji, Y. He, and S. Gregory, “Statistical analysis of the effect of operating parameters on acid mist generation in copper electrowinning,” *Hydrometallurgy*, vol. 106, no. 1–2, pp. 113–118, 2011, doi: 10.1016/j.hydromet.2010.12.013.
- [22] G. E. Dieter and L. C. Schmidt, *Engineering Design*, Fourth Edi., vol. 57. New York: McGraw-Hill Higher Education, 2009.
- [23] Centro Nacional de pilotaje de tecnologías para la minería, “Nueva tecnología en hidrometalurgia: Validación de planta EWTECH para producir cátodos de cobre para la pequeña y mediana minería.” <https://pilotaje.cl/nueva-tecnologia-en-hidrometalurgia-validacion-de-planta-ewtech-para-producir-catodos-de-cobre-para-la-pequena-y-mediana-mineria/>.