

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL



**“USO DE UN TITULADOR POTENCIOMÉTRICO DIGITAL
CON LA FINALIDAD DE OPTIMIZAR LOS ANÁLISIS EN EL
PROCESO DE OBTENCIÓN DE COBRE”**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

POR LA MODALIDAD DE ACTUALIZACIÓN DE CONOCIMIENTOS

PRESENTADO POR:

FIDEL ANDRÉ GONZALES ARIAS

**LIMA – PERÚ
2013**

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado:

A Dios por regalarme el don de la vida, permitiéndome llegar hasta este punto y dejarme disfrutar su infinita bondad.

A la Virgen María, porque al igual que al lado de su hijo Jesucristo, siempre estuvo conmigo brindándome su amor incondicional de madre.

A mis padres Fidel y Maribel, porque creyeron en mí y me sacaron adelante, dándome ejemplos dignos de superación y entrega, porque en gran parte gracias a ellos, hoy puedo ver alcanzada una de mis meta, ya que siempre estuvieron impulsándome en los momentos más difíciles de mi carrera, y porque el orgullo que sienten por mí, fue lo que me hizo llegar hasta el final.

A mi gran amor Miluska, por haberme regalado el don de ser padre de un hermoso niño, y porque a pesar de las dificultades que la vida nos ha puesto en el camino; ha estado siempre conmigo apoyándome.

A mi hijo Joaquín, porque desde que llegó al mundo, llenó mi vida de alegría y se convirtió en la razón y el motor de mi vida.

A mis hermanos Mijael y Fátima, gracias por haber fomentado en mí el deseo de superación y el anhelo de triunfo en la vida.

A mis tíos, primos, abuelos y amigos. Mil palabras no bastarían para agradecerles su apoyo, su comprensión y sus consejos en los momentos difíciles.

A todos, espero no defraudarlos y contar siempre con su valioso apoyo, sincero e incondicional.

AGRADECIMIENTO

Debo agradecer de manera especial y sincera a las personas que me dieron la vida, mis padres, por cuyo esfuerzo fue posible este logro, el cual no es mío, sino suyo en realidad.

Debo agradecer también a mis hermanos, por el apoyo que me brindaron durante todos mis años de estudio, por su cariño, comprensión y todo su apoyo.

También me gustaría agradecer a mis profesores quienes durante toda mi carrera han aportado enormemente con la transmisión de sus conocimientos en mi formación profesional

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó la descripción del proceso productivo del cobre, poniendo énfasis en la titulación en la etapa de análisis químico del concentrado del mismo dentro de su proceso de obtención en la industria minera.

Al haber puesto énfasis en esta etapa del proceso, se describió la metodología tradicional, identificando con ello los pasos en donde se puedan reducir los errores que se presentan normalmente, con el fin de reducirlos y poder acelerar el proceso de análisis.

Para lograr tal fin, se ha propuesto la implementación de un equipo titulador potenciométrico automatizado para la etapa de titulación en el análisis de éste concentrado, pudiendo controlar la titulación desde un software computacional, obtener datos en tiempo real y realizar el tratamiento de datos con los resultados obtenidos.

La implementación de este equipo permitiría la optimización del tiempo en las horas de trabajo, así como la utilización de menor cantidad de recursos y la reducción de errores en los resultados, causados por errores humanos y de medición, con la finalidad de que la empresa pueda procesar mayor cantidad de muestras sin perder precisión en sus resultados, obteniendo así mayores ganancias.

INDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN	12
II. CONCEPTOS GENERALES	15
2.1. ¿QUÉ ES EL COBRE?	15
2.2. PROPIEDADES DEL COBRE	17
2.3. USOS DEL COBRE	26
2.4. PROCESO PRODUCTIVO DEL COBRE	29
2.4.1. Mina	29
2.4.1.1 Perforación y disparo	29
2.4.1.2 Carguío y acarreo	29
2.4.2. Concentradora	30
2.4.2.1 Chancado o trituración	30
2.4.2.2 Molienda	31
2.4.2.3 Flotación	31
2.4.2.4 Filtrado y secado	32
2.4.2.5 Carguío y acarreo a fundición	32
2.4.3. Fundición	32
2.4.3.1 Descarga de concentrado y formación de camas	32
2.4.3.2 Fundición y convertidores	33
2.4.3.3 Transporte a refinería	34
2.4.4. Refinería	34

2.4.4.1	Planta electrolítica	34
2.4.4.2	Embarque	35
2.5.	FUNDAMENTO DE LA TITULACIÓN VOLUMÉTRICA DE CONCENTRADO DE COBRE POR YODOMETRÍA	37
2.5.1.	Principio	37
2.5.2.	Interferentes	37
2.5.3.	Equipos y materiales	38
2.5.4.	Estandarización de la solución	38
2.5.5.	Procedimiento	39
2.5.6.	Cálculos y expresión de resultados	40
2.6.	BASES DE LA POTENCIOMETRÍA	41
2.6.1.	Construcción de un electrodo	41
2.6.2.	Desde el potencial medido hasta la concentración de iones	43
2.6.3.	Valor de pH	45
2.6.4.	Potencial REDOX (Electrodos de metal)	46
2.7.	ELECTRODOS DE METAL	46
III.	SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS MEDIANTE PC DE LA ETAPA DE TITULACIÓN YODOMÉTRICA	47
3.1.	EQUIPOS Y SOFTWARE USADOS	47
3.1.1.	Titulador potenciométrico	47
3.1.1.1	Descripción del aparato	49
3.1.1.2	Modos de titulación, modos de medida e instrucciones de dosificación	49

3.1.2.	Electrodo de platino	51
3.1.3.	Procesador de muestras	53
3.1.3.1.	815 Robotic USB Sample Processor XL en el sistema Titrandó	53
3.1.3.2.	Descripción del aparato	53
3.1.4.	Agitador de paletas	56
3.1.4.1.	Descripción del aparato	56
3.1.5.	Bomba de succión	56
3.1.5.1.	Descripción del aparato	56
3.1.6.	Unidad dosificadora (Dosino)	57
3.1.6.1.	Descripción del aparato	57
3.1.7.	Software Tiamo (Titration and more)	58
3.1.8.	Configuración usada para la titulación automatizada en la Sociedad Minera Cerro Verde	63
3.2.	MÉTODO USADO EN EL SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS MEDIANTE PC PARA REALIZAR LA ETAPA DE TITULACIÓN	64
3.2.1.	Elección de los parámetros principales de titulación	64
3.2.2.	Método de titulación usado en la SMCV	68
3.3.	OBTENCIÓN Y TRATAMIENTO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON EL SOFTWARE	70
3.3.1.	Visualización de resultados	70
3.3.2.	Tratamiento de datos	71

IV.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	73
4.1	Conclusiones	73
4.2	Recomendaciones	74
V.	REFERENCIAS	75

INDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1: Muestra de cobre metálico	15
Figura 2: Muestras de minerales sulfurados de cobre, de izquierda a derecha: Calcopirita, Bornita, Enargita, Tetraedrita	16
Figura 3: Muestras de minerales oxidados de cobre, de izquierda a derecha: Malaquita, Azurita, Crisocola, Cuprita, Brochantita	17
Figura 4: Alambres de cobre que demuestran su ductilidad	20
Figura 5: Techumbres y utensilios decorativos usando cobre	26
Figura 6: Equipos electrónicos utilizando cobre en su configuración	26
Figura 7: Tuberías y alambres de cobre	27
Figura 8: Cobre utilizado en instrumentos musicales y en monedas	27
Figura 9: Cobre utilizado en techos y en tuberías	27
Figura 10: Utensilios de baño a base de cobre	28
Figura 11: Carguío de mineral extraído	29
Figura 12: Mineral reducido a un tamaño de dos pulgadas aproximadamente	29
Figura 13: Las rocas de mineral son pulverizadas en grandes molinos	30
Figura 14: Obtención de concentrado por flotación	30
Figura 15: Concentrado deshidratado para su posterior transporte a fundición	31
Figura 16: Formación de camas de concentrado deshidratado	32
Figura 17: Cobre líquido enviado a los convertidores	32
Figura 18: Cobre líquido vertido en moldes	33

Figura 19:	Cátodos de cobre de 99,99% de pureza	34
Figura 20:	Diagrama de flujo general del proceso de obtención de cobre	35
Figura 21:	Diagrama esquemático de un electrodo de pH	41
Figura 22:	Diagrama esquemático de un electrodo redox	42
Figura 23:	Aparatos periféricos que pueden ser conectados a un titulador Titrande	48
Figura 24:	Electrodo Pt titrode	52
Figura 25:	Aparatos periféricos que pueden conectarse a un 815 Sample Processor	54
Figura 26:	815 Robotic USB Sample Processor XL	55
Figura 27:	Agitador de hélice 802	56
Figura 28:	Unidad de Bomba 772	57
Figura 29:	800 Dosino y Unidad de dosificación de 20 ml	58
Figura 30:	Visualización del escritorio del software Tiamo	60
Figura 31:	Fotografía de equipos para titulación potenciométrica instalados en el laboratorio químico de la Sociedad Minera Cerro Verde	63
Figura 32:	Captura de pantalla del escritorio del software Tiamo, visualizando las parámetros generales de titulación	64
Figura 33:	Captura de pantalla del escritorio del software Tiamo, visualizando las parámetros principales de titulación	65

Figura 34:	Captura de pantalla del escritorio del software Tiamo, visualizando las condiciones de parada	66
Figura 35:	Captura de pantalla del escritorio del software Tiamo, visualizando los parámetros de evaluación potenciométrica	67
Figura 36:	Captura de pantalla del escritorio del software Tiamo, visualizando el método usado en la titulación en SMCV	69
Figura 37:	Fotografía tomada durante la titulación de las soluciones de muestras en el laboratorio químico en SMCV	69
Figura 38:	Captura de pantalla del resultado obtenido con el software de una muestra de solución de concentrado.	70
Figura 39:	Captura de pantalla de los resultados obtenidos al término de una titulación	71
Figura 40:	Captura de pantalla la tendencia de los resultados obtenidos y las estadísticas.	72
Figura 41:	Captura de pantalla donde se muestra la reproducibilidad de los resultados.	72

INDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1: Información general del cobre	15
Tabla 2: Especificaciones del electrodo de anillo de platino Pt Titrode	52
Tabla 3: Descripción de los botones de acceso del software Tiamo	60

I. INTRODUCCIÓN

La situación económica del país se ve respaldada grandemente por su producción minera, en ese sentido; en el marco de un país en vías de desarrollo y con un gran potencial aún por explotar en ésta área, el sector se encuentra en la necesidad de buscar nuevas tecnologías que le permitan mejorar sus procesos productivos optimizándolos.

En la actualidad, de acuerdo a información de la publicación anual del Servicio Geológico de EE.UU.⁽⁴⁾ (USGS, por sus siglas en inglés), el Perú solo produce el 23% de lo que produce Chile (nuestro más cercano competidor) y aproximadamente el 7% de la producción total mundial mientras que Chile el 32%. En ese sentido podemos decir que si bien es muy difícil que el Perú llegue al primer lugar de producción de cobre en el corto plazo, es una posibilidad real ⁽⁸⁾ y las razones fundamentales por las que no se ha logrado aún este propósito son dos principalmente: pérdida de competitividad por los altos costos (energía y mano de obra con bajos niveles de productividad) y aumento de incertidumbre en los plazos de ejecución de los proyectos.

En ese sentido, este trabajo tiene como objetivo resaltar el aporte en uno de estos aspectos: El aumento de la productividad, al ayudar a disminuir el tiempo de obtención de resultados en el laboratorio químico al analizar concentrados de cobre con una metodología de tecnología moderna, pudiendo analizar mayor cantidad de muestras conservando y hasta mejorando la reproducibilidad de los resultados obtenidos.

En el presente trabajo se realiza la identificación de las mejoras obtenidas en el laboratorio químico de la Sociedad Minera Cerro Verde luego de implementar en su laboratorio químico el uso de un titulador potenciométrico para la determinación de cobre en sus concentrados.

En la actualidad la metodología utilizada en el laboratorio químico de la Sociedad Minera Cerro Verde para la determinación de la concentración de cobre en sus soluciones de concentrados es por titulación volumétrica por yodometría; para lo cual se

ha propuesto la implementación de un titulador potenciométrico automatizado para la optimización de esta etapa.

En el capítulo 2 se hace referencia de los conceptos generales involucrados en el proceso de obtención del cobre, así como la metodología tradicional utilizada en el laboratorio químico para la determinación de las concentraciones del mismo en sus soluciones de concentrados. De igual modo se han definido los conceptos básicos de la potenciometría y el principio del electrodo usado para el análisis.

En el capítulo 3 se describen a los equipos y el software utilizados en la automatización propuesta para la etapa de titulación; así como la forma de crear un método de análisis para la titulación potenciométrica, cómo se visualizan los datos adquiridos, como se identifica el punto de equivalencia y como se puede realizar el tratamiento de estos resultados.

La parte más importante de este capítulo es donde se detallan los modos y parámetros de titulación, cuya configuración será la que permitirá la mejora sustancial de los resultados obtenidos, permitiendo obtenerlos dentro de los rangos requeridos, ajustándose a la tendencia del historial de resultados que se tienen previamente por ensayos con la metodología tradicional y mejorando la precisión de los mismos permitiendo la reproducibilidad de ellos, reduciendo el error obtenido propio de los ensayos tradicionales.

En el capítulo 4 se hace referencia a las observaciones y conclusiones que se puede obtener de la implementación de esta propuesta de mejora tecnológica teniendo en cuenta que la implementación de este sistema de titulación permitiría un gran ahorro en el tiempo de análisis, trabajaría un mayor número de muestras y reduciría la variación entre los resultados obtenidos; permitiendo finalmente que la empresa obtenga mayores ganancias al incrementar su productividad.

Finalmente en el capítulo 5 se enumeran las referencias utilizadas para la elaboración de este informe y en el capítulo 6 se han agregado los anexos que complementan parte de la información presente en los capítulos anteriores.

II. CONCEPTOS GENERALES

Para un mejor entendimiento de la etapa en donde se propone el uso del equipo titulador tema de este informe, se dará una breve conceptualización de las etapas del proceso productivo para obtención de cobre, así como la descripción de la metodología tradicional y de los principios de la titulación potenciométrica.

2.1. ¿QUÉ ES EL COBRE?

El cobre es un elemento metálico, de color rojizo que junto a la plata y el oro, forman la “familia del cobre”, los mejores conductores de electricidad.

Tabla 1: Información general del cobre

Cobre	Cu
Nº Atómico	29
Electrones por nivel	2,8,18,1
Tº de ebullición	2595°C
Tº de Fusión	1083,4°C
Peso atómico	63,546
Electronegatividad	1,9
Configuración electrónica	[Ar]3d ¹⁰ 4s ¹



Figura 1: Muestra de cobre metálico ⁽²⁾
Fuente: Revista Rumbo Minero

Hace millones de años e impulsado por los procesos geológicos subió desde las profundidades de la tierra hasta la superficie, por lo que fue el primero de los metales en ser trabajado por los seres humanos, bajo la forma de cobre nativo o natural de alta pureza.

Este tipo de yacimientos hoy en día están prácticamente agotados en el planeta, por lo que habitualmente se encuentra disperso en grandes áreas y mezclado con rocas estériles y otros minerales.

A grandes rasgos el cobre se puede clasificar en dos grupos:

a) Minerales sulfurados

Frecuentemente son mezclas de sulfuro de cobre con hierro, combinados con compuestos de otros diferentes elementos. Los más importantes son: Calcopirita, Bornita, Enargita y Tetraedrita.

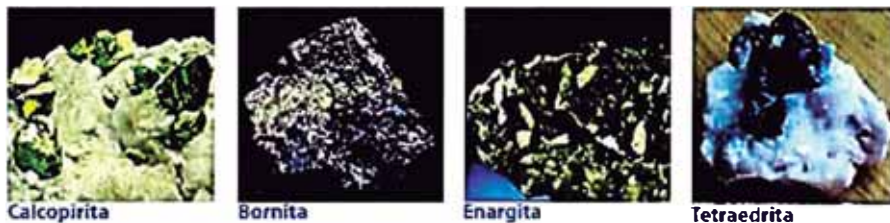


Figura 2: Muestras de minerales sulfurados de cobre, de izquierda a derecha: Calcopirita, Bornita, Enargita, Tetraedrita ⁽¹⁾
Fuente: CODELCO

b) Minerales oxidados

Los minerales oxidados del cobre se originan de la descomposición y oxidación de los minerales sulfurados. Fueron los primeros explotados. Las principales son: Malaquita, Azurita, Crisocola, Cuprita, Brochantita.



Figura 3: Muestras de minerales oxidados de cobre, de izquierda a derecha: Malaquita, Azurita, Crisocola, Cuprita, Brochantita ⁽¹⁾
Fuente: CODELCO

2.2. PROPIEDADES DEL COBRE

2.2.1. Resistente a la corrosión

La corrosión es cuando la interacción de un metal con el medio que lo rodea deteriora sus propiedades tanto físicas como químicas. El cobre y sus aleaciones pertenecen al grupo de metales que son más resistentes que otros a la corrosión gracias a una película protectora que crece naturalmente en ciertos medio ambientes.

Por esta razón los productos fabricados en base a cobre tienen una vida útil muy larga, ya que conservan sus características originales con el paso del tiempo.

El cobre es de los metales más usados en la fabricación de tuberías, ya que tiene la menor tendencia a la corrosión y permanece inalterado frente a condiciones que hacen que otros metales se corroan.

Esta propiedad del cobre le ha permitido ser considerado apto para la construcción. Además, su ductilidad y maleabilidad le otorgan una gran resistencia mecánica, que le permite soportar los esfuerzos del proceso de doblado y la manipulación de los obreros.

La resistencia del cobre es legendaria. Existen referencias que señalan que el cobre como material de construcción se ha mantenido en buen estado durante muchos años, siendo los soportes –y no el cobre- los que fallan en la mayoría de los casos. Por esta razón, construcciones realizadas con cobre pueden ser habitables por décadas aun en los ambientes más hostiles. Por su alta resistencia a las inclemencias del tiempo, el cobre ha

demostrado una durabilidad que supera los 100 años aun en ambientes marinos o corrosivos.

Está comprobado que en el campo de la edificación industrial, en espacios de atmósferas agresivas y contaminadas, el cobre junto con el acero inoxidable son los materiales más resistentes a la acción de ácidos y detergentes fuertes.

A lo anterior se suma su alta temperatura de fusión (1083°C), lo que lo hace muy resistente al fuego, siendo capaz de retardar el avance de un incendio.

Por ser resistente a la corrosión el cobre se usa en:

- Cascos de embarcaciones y plataformas marinas.
- Cubiertas, techumbres y desagües.
- Pernos, clavos.
- Usos decorativos interiores.

2.2.2. Conductor de electricidad

La principal propiedad del cobre es su alta conductividad eléctrica y capacidad de transmisión de voz y datos.

Su extraordinaria conductividad (del 100% en el cobre puro) es solo superada por la plata, por lo que su uso más extendido se da en la industria eléctrica.

En las redes de distribución de baja tensión, el cobre tiene propiedades especialmente ventajosas en comparación a otros conductores. Por una parte, es el más eficiente porque es uno de los metales con el menor índice de resistencia, y una mayor capacidad de conducción. Si tomamos como ejemplo un conductor de cobre y otro de aluminio del mismo calibre, el primero tiene una capacidad de conducción 28% superior a la del segundo, y presenta mayor caída de tensión. Es más: en un conductor de cobre, las pérdidas por Efecto Joule son de un 58% menos que con respecto al aluminio.

Por otra parte, los conductores de cobre no necesitan el uso de "manguitos" bimetálicos o conectores. La presencia de cobre en los conductores garantiza la eliminación de probables fallas originadas por falsos contactos debido a óxido no conductivo (como ocurre con el aluminio), y proporciona una mayor facilidad en el empleo de soldaduras terminales y/o empalmes.

Por ser conductor de electricidad, el cobre se usa en:

- Cables eléctricos
- Telefonía
- Electrónica
- Computadores
- Transporte
- Electrodomésticos

2.2.3. Conductor térmico

El cobre es un muy buen conductor térmico, ya que permite que el calor se distribuya uniformemente a lo largo de su superficie. Esto hace posible, por ejemplo, que la ebullición de los líquidos en un utensilio de cocina sea pareja y constante.

Esta propiedad en combinación con otras —como el ser fuerte, resistente a la corrosión y no magnético— permite su uso en aleaciones destinadas a la construcción de maquinaria especializada y piezas para procesos industriales.

Por ser conductor térmico, el cobre se usa en:

Utensilios de cocina

Radiadores

Paneles solares

2.2.4. Maleable y dúctil

El cobre es dúctil ya que es capaz de alargarse y estirarse. También es maleable ya que de él se pueden obtener láminas muy delgadas. De hecho, ocupa el cuarto lugar entre los metales más maleables, después del: oro, plata y platino, y antes que el estaño, plomo, zinc, hierro y níquel. Su capacidad de deformarse en caliente y en frío, permite que el trabajo en cobre sea relativamente fácil, pudiendo adaptar su grosor y forma a las distintas necesidades.

Si las láminas de cobre se refuerzan haciendo pliegues, es posible obtener resistencias entre dos puntos de apoyo con cargas de hasta 450 kg/m².

Por ser maleable y dúctil, el cobre se usa en:

- Cañerías
- Tuberías
- Alambres
- Artesanías
- Alfileres, botones

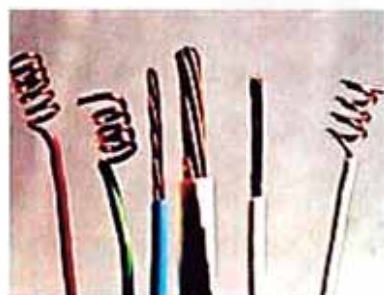


Figura 4: Alambres de cobre que demuestran su ductilidad ⁽¹⁾

Fuente: CODELCO

El cobre también se puede mezclar con otros metales ya que la mayoría de los metales no se usan en estado puro, sino mezclados. En este proceso, denominado aleación, se combinan dos o más metales, incluso a veces con trazas de otros elementos para lograr las características deseadas, como mayor dureza o resistencia.

El cobre tiene una alta capacidad de aleación metálica. Las aleaciones de cobre mucho más duras que el metal puro, presentan una mayor resistencia y por ello no pueden utilizarse en aplicaciones eléctricas.

No obstante, su resistencia a la corrosión es casi tan buena como la del cobre puro y son de fácil manejo. Las dos aleaciones más importantes son el latón, una aleación con zinc, y el bronce, una aleación con estaño. A menudo, tanto el zinc como el estaño se funden en una misma aleación, haciendo difícil una diferenciación precisa entre el latón y el bronce. Ambos se emplean en grandes cantidades.

Por ser maleable con metales, el cobre se usa en:

- Monedas
- Armas
- Instrumentos musicales

2.2.5. Reciclable

El cobre es un material 100% reciclable, que permite recuperar metales de sus aleaciones y que mantiene sus propiedades (químicas y físicas) en el reciclaje.

Se estima que de todo el cobre extraído durante la historia de la humanidad, el 80% aún permanece en uso, porque la tasa de reciclaje del cobre es más alta que la de cualquier otro metal. Esto, en parte debido a la durabilidad y solidez de los productos del cobre, que hacen posible la existencia permanente de metal para ser reciclado.

Virtualmente todos los productos hechos de cobre pueden ser reciclados, en todas las etapas del ciclo de vida del producto que componen. Si el residuo es cobre puro y no ha sido contaminado con otros metales, se puede generar un producto de alta calidad a partir de él.

Igualmente, si el residuo se mantiene segregado y consiste de solo una aleación, es más fácil transformarlo en un producto de buena calidad. Esta propiedad resulta

especialmente beneficiosa para el medio ambiente y la industria de la construcción, al generar menos residuos y permitir el ahorro de energía.

Por ser reciclable, el cobre se usa en:

- Tuberías y techos

2.2.6. Bactericida

Antes de que se conociera que los microorganismos existían, los ciudadanos del antiguo Imperio Romano usaban el cobre para mejorar la higiene pública. Se dieron cuenta que el agua transportada a través de este material era segura de beber y que los utensilios de cobre para cocinar ayudaban a prevenir enfermedades.

Mucho después, cuando fueron descubiertos los microbios y se relacionaron gérmenes, bacterias y otros microorganismos con infecciones y enfermedades, los científicos comenzaron a entender cómo la propiedad antimicrobiana del cobre podía ser utilizada para proveer beneficios adicionales.

El cobre evita la proliferación de ciertas bacterias, limitando su crecimiento o inactivándolo. Tiene una acción bactericida contra ciertos agentes infecciosos como la *Escherischa colli* (bacteria causante de diarreas) y el vibrión del cólera, cualidad que no tienen otros materiales como el PVC (plástico) o el aluminio. Muchas especies de bacterias dañinas, moho, algas y hongos son inactivados, y otros tienen una tasa de 0% de supervivencia.

El contacto permanente de nuestras manos con accesorios de cobre o sus aleaciones (pasamanos, barras, muros, griferías, manillas), nos protege en forma natural de microorganismos que no podemos ver a simple vista. Por eso, el cobre ha jugado un rol significativo y a veces sorprendente en mejorar la salud pública. Sus propiedades antimicrobianas ayudan a proteger contra infecciones en hogares, en el trabajo, en hospitales y contra enfermedades importantes para varios cultivos agrícolas.

En febrero de 2008, la Agencia de Protección Medioambiental de Estados Unidos, EPA, aprobó el registro de 270 aleaciones de cobre, reconociendo su propiedad bactericida en superficies de contacto, con aplicaciones en salud. El cobre es el metal más eficiente en el mundo para eliminar bacterias, virus y hongos en esos usos.

Por sus propiedades bactericidas, el cobre se usa en:

- Aire acondicionado
- Herraduras de los caballos
- Superficies y pinturas
- Cañerías y griferías
- Salmonicultura
- Pasamanos del metro
- Barandas en camillas de hospitales
- Superficies de zonas críticas de hospitales
- Textil: toallas, calcetines, ropa interior, plantillas

2.2.7. Necesario para la salud

El cobre es un elemento básico para la vida humana. Su consumo es necesario para el funcionamiento de algunas enzimas vitales para el metabolismo energético, es importante para el sistema nervioso y el equilibrio de otros minerales beneficiosos como el zinc y el molibdeno.

La dieta alimenticia diaria de un adulto requiere entre 1 y 2 miligramos de cobre, mientras que la de los niños necesita entre 0,5 y 1 miligramo. En dosis adecuadas favorece la actividad metabólica del hígado, el cerebro, los riñones y el corazón.

El cuerpo no puede fabricar cobre, por lo que la principal fuente de cobre para la alimentación humana, sin importar la edad, es la dieta alimenticia. El cobre es un ingrediente natural en la mayoría de los alimentos. En general, se encuentra presente en los alimentos ricos en minerales como verduras (papas), legumbres (porotos y arvejas), cereales (centeno y trigo), frutas (duraznos y pasas), nueces, maní y chocolate.

Como es un elemento natural que se encuentra en la corteza terrestre, la mayoría de las aguas superficiales y subterráneas del mundo que se utilizan para beber contienen cobre. Este no es riesgoso para el ser humano, incluso hay casos donde el agua llega a tener "un sabor metálico".

El cobre produce energía combustible y previene enfermedades óseas, detiene el daño celular; y promueve el desarrollo fetal apropiado. El cobre es necesario en la fabricación de tejido conectivo, el cual une una parte del cuerpo con otra, mantiene los órganos en su lugar, refuerza el corazón y los vasos sanguíneos, y refuerza la fortaleza de los huesos. La importante función del cobre en la formación de colágeno, un tejido conectivo en los huesos y la piel, subraya el hecho de que el calcio y el cobre son vitales para la formación y mantención de huesos fuertes. De hecho, estudios realizados con animales han demostrado que las fracturas óseas, las anomalías esqueléticas y la osteoporosis son más frecuentes cuando hay deficiencia de cobre.

El cobre ayuda a convertir el hierro en su forma férrica, el tipo más útil, y también ayuda a transportar el hierro hacia y desde los tejidos. Una deficiencia de cobre puede producir anemia y una sobrecarga de hierro en los tejidos.

La deficiencia de cobre con síntomas severos es escasa, pero la investigación demuestra que no todas las personas logran las metas recomendadas de cobre diario, diseñadas para una salud óptima.

Aunque el cobre se encuentra en los lugares más recónditos del cuerpo, tiende a concentrarse en los órganos con alta actividad metabólica, incluyendo el hígado, cerebro, riñones y corazón.

Es importante para tener bebés saludables, ya que el cuerpo de un feto almacena el mineral durante el último trimestre del embarazo para asegurar que el cobre esté disponible después del nacimiento para llevar a cabo docenas de funciones metabólicas.

El cobre es crucial para la formación óptima del cerebro y sistema nervioso de un niño. El mineral es responsable de la producción y mantención de la mielina, el material que

rodea y protege las células nerviosas y cerebrales. El cobre desempeña además una función en la fabricación de neurotransmisores, los mensajeros químicos que propician la comunicación entre las células nerviosas.

El cobre defiende a las células de la oxidación perjudicial. Los radicales libres recorren su cuerpo buscando crear problemas a través de la oxidación de las células sanas. Los científicos dicen que las células oxidadas aumentan su riesgo de contraer cáncer y enfermedades cardíacas. Afortunadamente, el cobre cumple una función en la elaborada defensa del cuerpo contra la oxidación. Como parte de las enzimas encontradas dentro y alrededor de las células, el cobre ayuda al cuerpo a neutralizar los radicales libres para impedir la destrucción celular.

Los lactantes prematuros y ciertos niños están particularmente predispuestos a una deficiencia de cobre. Alimentarlos con fórmulas lácteas que pueden ser bajas en cobre disponible, exacerba el problema. Los lactantes que se están recuperando de una desnutrición asociada a una diarrea crónica también deben evitar una dieta basada principalmente en la leche de vaca debido a sus muy bajos niveles de cobre.

Aunque extraordinariamente escaso, algunas personas pueden estar genéticamente predispuestas a un trastorno relacionado con el cobre. La enfermedad de Menkes es un trastorno hereditario del metabolismo del cobre que produce una deficiencia de cobre y, finalmente, un daño irreversible. Por contraste, la enfermedad de Wilson está marcada por la excreción defectuosa de cobre. Como resultado, el cobre se acumula en los tejidos, incluyendo el hígado, cerebro y córnea

2.3. USOS DEL COBRE

Por ser resistente a la corrosión, el cobre se usa en:

- Cascos de embarcaciones y plataformas marinas
- Cubiertas, techumbres y desagües
- Pernos, clavos
- Usos decorativos interiores



Figura 5: Techumbres y utensilios decorativos usando cobre. ⁽¹⁾
Fuente: CODELCO

Por ser conductor de electricidad, el cobre se usa en:

- Cables eléctricos
- Telefonía
- Electrónica
- Computadores
- Transporte
- Electrodomésticos



Figura 6: Equipos electrónicos utilizando cobre en su configuración. ⁽¹⁾
Fuente: CODELCO

Por ser conductor térmico, el cobre se usa en:

- Utensilios de cocina
- Radiadores
- Paneles solares

Por ser maleable y dúctil, el cobre se usa en:

- Cañerías
- Tuberías
- Alambres
- Artesanías
- Alfileres, botones



Figura 7: Tuberías y alambres de cobre ⁽¹⁾
Fuente: CODELCO

Por ser maleable con metales, el cobre se usa en:

- Monedas
- Quincallería
- Armas
- Instrumentos musicales



Figura 8: Cobre utilizado en instrumentos musicales y en monedas. ⁽¹⁾
Fuente: CODELCO

Por ser reciclable, el cobre se usa en:

- Industria
- Tuberías y techos



Figura 9: Cobre utilizado en techos y en tuberías. ⁽¹⁾
Fuente: CODELCO

Por sus propiedades bactericidas, el cobre se usa en:

- Aire acondicionado
- Agricultura
- Herraduras de los caballos
- Superficies y pinturas
- Productos de consumo
- Cañerías y griferías
- Salmonicultura



Figura 10: Utensilios de baño a base de cobre. ⁽¹⁾
Fuente: CODELCO

2.4. PROCESO PRODUCTIVO DEL COBRE

2.4.1. Mina

2.4.1.1. Perforación y disparo

Para alcanzar el mineral se debe remover la roca en el yacimiento, por lo que se perfora el terreno y se coloca una carga explosiva. Una vez fracturada la roca se procede a la selección de material para determinar si debe ser empleado en la concentradora, en el proceso de lixiviación o en programas de vegetación.

2.4.1.2. Carguío y acarreo

Las minas a cielo abierto tienen forma cónica, por lo que para alcanzar el mineral se deben construir niveles a manera de escalones gigantes de 15 metros de altura, los que se encuentran comunicados por rampas o caminos a desnivel.

El mineral extraído con una ley mayor al 0,3% es cargado en palas y depositado en enormes camiones los que trasladan el material a la planta concentradora.

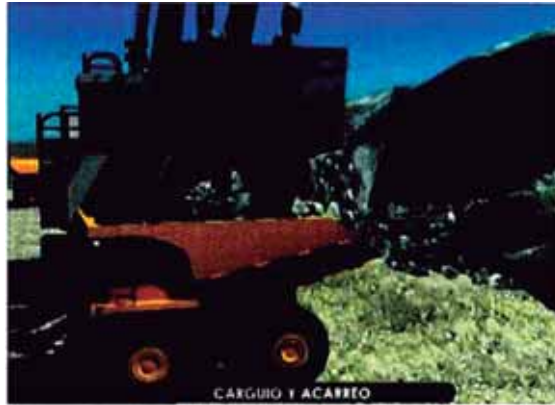


Figura 11: Carguío de mineral extraído. ⁽⁶⁾
Fuente: Southern Copper

2.4.2. Concentradora

2.4.2.1. Chancado o trituración

El primer paso en la planta concentradora es el chancado. El mineral proveniente de la mina es triturado hasta alcanzar un tamaño cercano a media pulgada.

Se inicia aquí el proceso de concentración, el cual consiste en la separación del mineral de aquello que no tiene valor.

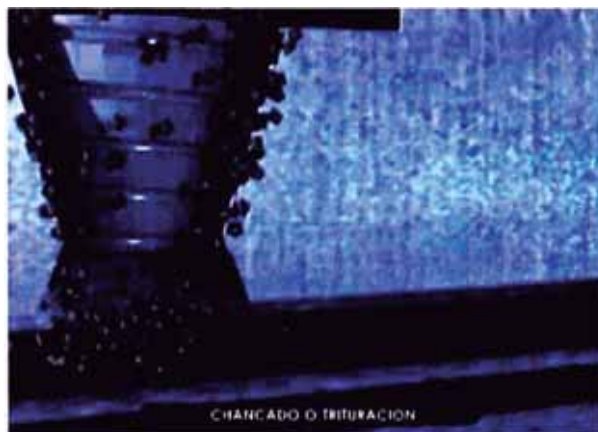


Figura 12: Mineral reducido a un tamaño de dos pulgadas aproximadamente. ⁽⁶⁾
Fuente: Southern Copper

2.4.2.2. Molienda

Posteriormente el material triturado es trasladado a los molinos, donde las rocas son pulverizadas. En esta etapa del proceso se emplea agua, lo que permite liberar las partículas de cobre y molibdeno.



Figura 13:
Las rocas de mineral son pulverizadas en grandes molinos. ⁽⁶⁾
Fuente: Southern Copper

2.4.2.3. Flotación

Luego de la molienda se pasa a la etapa de flotación, donde se obtiene el concentrado, partículas del mineral de cobre y molibdeno.

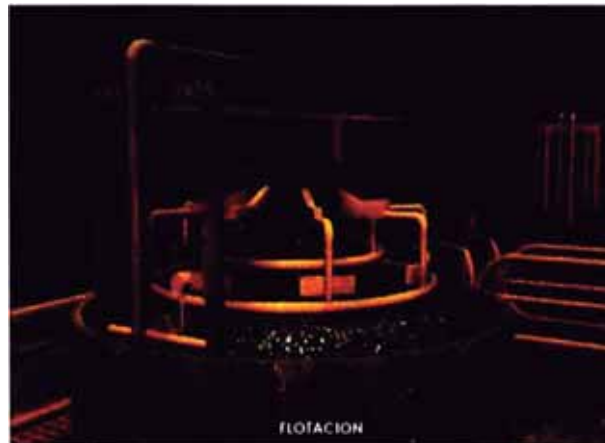


Figura 14:
Obtención de concentrado por flotación. ⁽⁶⁾
Fuente: Southern Copper

2.4.2.4. Filtrado y secado

El concentrado de cobre es deshidratado mediante filtros de alta presión o con el uso de calor. Aquí culmina la operación minera. El concentrado obtenido debe ser trasladado a la fundición para su posterior procesamiento.



Figura 15:
Concentrado deshidratado para su posterior transporte a fundición. ⁽⁶⁾
Fuente: Southern Copper

2.4.2.5. Carguío y acarreo a fundición

Luego de filtrado y secado el contenido metálico en el concentrado alcanza entre 26% y 28%. Tras la recuperación del agua empleada, ésta se vuelve a usar.

La mayor parte de los concentrados de cobre son transportados a través de camiones a la fundición. Mediante el proceso de fundición, el cobre contenido se purifica adicionalmente hasta convertirse en una barra de metal con un contenido de 99.7% de cobre llamado ánodo.

2.4.3. Fundición:

2.4.3.1. Descarga de concentrado y formación de camas

Al llegar a la fundición el mineral es descargado y organizado en camas que servirán para alimentar a la fundición.



Figura 16:
Formación de camas de concentrado deshidratado. ⁽⁶⁾
Fuente: Southern Copper

2.4.3.2. Fundición y convertidores

El concentrado procedente de la mina es llevado a la fundición donde será sometido a temperaturas mayores a 1100°C.

En esta etapa el concentrado se ha convertido en cobre líquido.



Figura 17:
Cobre líquido enviado a los convertidores. ⁽⁶⁾
Fuente: Southern Copper

La mata de cobre o cobre líquido que contiene aproximadamente 65% de cobre, se envía a los convertidores en donde se transforma en cobre ampolloso con contenido de cobre de 98% a 99% o cobre anódico con 99.7% de cobre.

La etapa final del proceso de fusión de cobre es el moldeo. El cobre líquido es vertido en moldes, donde una vez condensado se obtienen las barras de ánodos de cobre. Los ánodos pesan 435 kg. y tienen una pureza de 99.7% de cobre.



Figura 18:
Cobre líquido vertido en moldes. ⁽⁶⁾
Fuente: Southern Copper

2.4.3.3. Transporte a refinería

A continuación los ánodos pasan por un control de calidad. Los que se reúnen los estándares de la empresa son agrupados y transportados hacia la refinería. Cabe señalar que en el mundo también existe demanda de ánodos.

2.4.4. Refinería

2.4.4.1. Planta electrolítica

En la refinería los ánodos son sometidos a un proceso de electro refinación, que consiste en introducirlos en tanques de ácido sulfúrico y sulfato de cobre. Luego se les aplica una carga eléctrica de baja intensidad y, mediante una reacción química, el cobre de los

ánodos migra hacia las placas de arranque, dejando impurezas en la solución. En adelante el cobre contenido, en las placas de arranque se le denominará cátodos, cuyo contenido de cobre es de 99,99%.

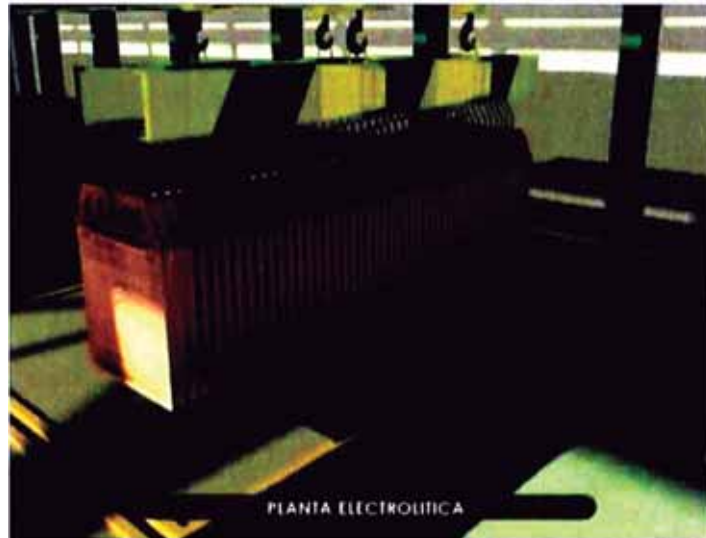


Figura 19:
Cátodos de cobre de 99,99% de pureza. ⁽⁶⁾
Fuente: Southern Copper

2.4.4.2. Embarque

Esta es la fase final del proceso minero metalúrgico, mediante la cual se despachan los principales productos concentrados, ánodos y cátodos a través de medios de transporte terrestre hacia el puerto para su posterior embarque a los principales centros industriales del mundo.

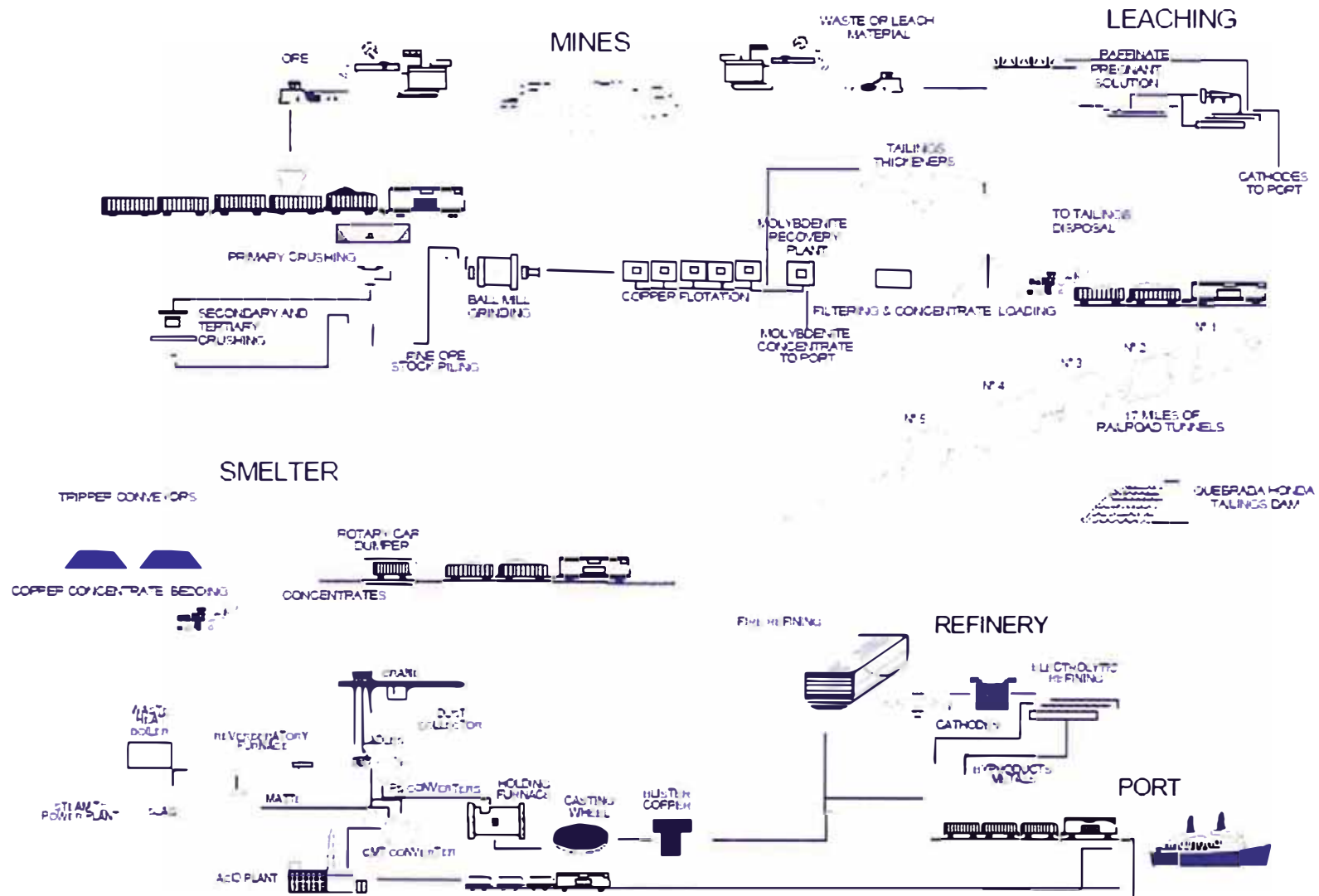


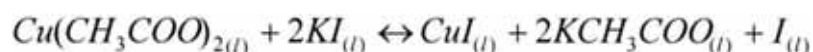
Figura 20: Diagrama de flujo general del proceso de obtención de cobre. ⁽⁵⁾

Fuente: Xstrata Copper

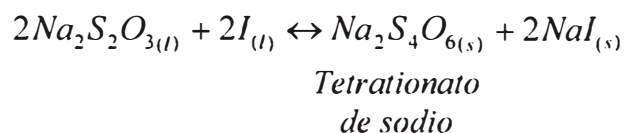
2.5. FUNDAMENTO DE LA TITULACIÓN VOLUMÉTRICA DE CONCENTRADO DE COBRE POR YODOMETRÍA

2.5.1. Principio

El cobre en la solución de su concentrado o en muestras de minerales de concentraciones superiores al 10%, es determinado por titulación yodometrica, el cual se basa en la medición del yodo liberado por la reacción del cobre II y el yoduro, usando como reductor una solución titulante de tiosulfato de sodio⁽²⁾, como puede verse en la siguiente ecuación:



Este yodo puesto en libertad es determinado por medio de una solución valorada de tiosulfato de sodio.



2.5.2. Interferentes

Los elementos más comunes que se encuentran asociados con el cobre en la naturaleza, que interfieren en el método y que pueden volverse inactivos, son hierro, arsénico y antimonio.

El hierro férrico es reducido por el yoduro. Las interferencias del hierro se evita usando el NaF, que forma el $\text{Na}_3[\text{FeF}_6]$, el cual no reacciona con el yoduro, en soluciones levemente ácidas. De esta forma el hierro se hace inactivo y el pH se ajusta al valor correcto, donde la reducción de los iones cúpricos es completa.

El arsénico y el antimonio no deben estar presentes en forma trivalente, pues consumen yodo. Estos elementos generalmente estarán presentes en el estado pentavalente como consecuencia del ataque oxidante, utilizado para disolver la muestra.

2.5.3. Equipos y materiales

- Balanza analítica 220g/ 0.1 mg
- Bureta graduada de 50 ml./ 0.1 ml
- Fiola de 1000 ml y 2000 ml.
- Matraz de 250 ml.
- Magneto, varilla y agitador magnético.
- Pinzas para matraz.
- Probetas de 20 mL.
- Pizeta de plástico de 1 L.
- Vasos de precipitación de 50 mL.

2.5.4. Estandarización de la solución

Método de digestión rápida con ácido nítrico (1:1)

Pesar por quintuplicado entre 0.05g a 0.06 g de cobre metálico en matraz de 250 ml y digerir con 10 mL de ácido nítrico (1:1) en plancha a temperatura de 180°C +/- 20°C, hasta que el cobre metálico se disuelva (no dejar que se seque completamente), bajar de la plancha, agregar 10 mL de solución de urea al 10% y dejar enfriar. Proseguir desde el ítem: 3 del procedimiento 2.5.7.

Nota 1: Otro método alternativo para la estandarización de la solución es aquella que usa ácido perclórico

Pesar por quintuplicado aproximadamente 0,05 g a 0,06 g de Cu metálico y transferir a un matraz de 250 mL, adicionar 3 mL de HClO₄ cc, y llevar a plancha caliente 180°C +/- 20°C y proseguir desde el paso 3 el ítem 2.5.5.

Nota 2: Para cualquiera de las formas de estandarización se puede usar nitrato de plata como indicador para que el viraje sea más notorio, a un amarillo intenso, en lugar de un blanco.

2.5.5. Procedimiento

1. Pesar 0.2500 g +/- 0.0002 g de muestra y transferir a un matraz de 250 mL.

Nota: para el caso de muestras de mayor concentración de cobre reducir la masa de la muestra a 0.05 g.

2. Humedecer la muestra con agua y adicionar 3 mL de ácido perclórico, llevar a la plancha a 225°C +/- 20°C y disgregar hasta pastoso, bajar y enfriar. Si la muestra no disgregara (presencia de puntos negros) adicionar 2 ml de ácido perclórico y continuar la disgregación.

3. Adicionar aproximadamente 20 mL de agua y hervir aproximadamente 3 minutos, para disolver las sales solubles de la muestra. Bajar de la plancha y enfriar.

4. Adicionar gota a gota la solución de hidróxido de amonio, hasta precipitar el hierro como hidróxido férrico, en caso de la muestra (precipitado de color marrón azulado) y la aparición de coloración azul “encendido” en el caso de los metálicos.

5. Adicionar 6 mL de solución de ácido acético.

6. Adicionar 10mL de solución de fluoruro de amonio.

Nota: El fluoruro no deberá ser agregado si la titulación no se realiza al momento.

7. Lavar las paredes del matraz con agua fría.

8. Antes de titular agregar 10 mL de solución de yoduro de potasio, colocar el magneto dentro del matraz y homogenizar con la ayuda del agitador magnético.

9. Titular con la solución valorada de tiosulfato de sodio hasta que la solución se torne amarillo “pálido”, luego agregar 5 mL de solución de almidón y continuar titulado hasta que el color (entre azul y violeta) comience a virar hacia un color blanco lechoso, entonces hacer un alto a la titulación y adicionar 10 mL de solución de tiocianato de amonio, y continuar titulado. El punto final de la titulación se notara con un precipitado blanco (cobre metálico) u amarillo intenso a blanco (para las muestras).

Nota: Terminada la titulación lavar los materiales de vidrio utilizado, para evitar su deterioro por efecto del fluoruro de amonio.

10. Analizar en paralelo muestra duplicada y materiales de referencia.

11. El gasto de tiosulfato utilizado en la titulación se registra.

2.5.6. Cálculos y expresión de resultados

Factor de tiosulfato:

$$f = \frac{WCu^0 (g)}{Wm * G_{Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O} (mL)} * 100$$

Donde:

WCu^0 : Peso de cobre metálico.

W_m : Peso de muestra para ensayos.

$G_{Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O}$: Gasto de la solución de tiosulfato de sodio en la titulación del cobre metálico.

Porcentaje de Cobre:

$$\%Cu = \frac{V * f * 100}{W_m}$$

Donde:

$\%Cu$ = Porcentaje de Cobre

V = Volumen de tiosulfato (ml)

f = Factor de tiosulfato

W_m = Peso de muestra (g).

2.6. BASES DE LA POTENCIOMETRÍA⁽³⁾

2.6.1. Construcción de un electrodo

En potenciometría la configuración de medición consiste siempre en dos electrodos: los electrodos de medición, también conocidos como el electrodo indicador, y el electrodo de referencia. Ambos electrodos son medias células o celdas. Cuando se coloca en una solución junta producen un cierto potencial. Según la construcción de la media celda, el potencial de producción es la suma de varios potenciales individuales. Las determinaciones del potencial siempre son en las transiciones y se producen en los límites de fase, por ejemplo entre la solución y la superficie del electrodo.

En la figura 21 se distingue lo siguiente:

- ✓ Electrodo de vidrio (izquierda) - Electrodo de medida

U_1 = Galvani potencial entre la solución de medición y membrana de vidrio

U_2 = Galvani potencial entre la membrana de vidrio y electrolito interno

U_3 = Galvani potencial entre el electrolito interno y el electrodo de referencia interno

- ✓ Electrodo de referencia - cloruro de plata / plata (a la derecha)

U_4 = Galvani potencial de electrodo de referencia

U_5 = potencial de membrana (potencial de difusión)

a_M = Actividad del ion medido en la solución de la muestra.

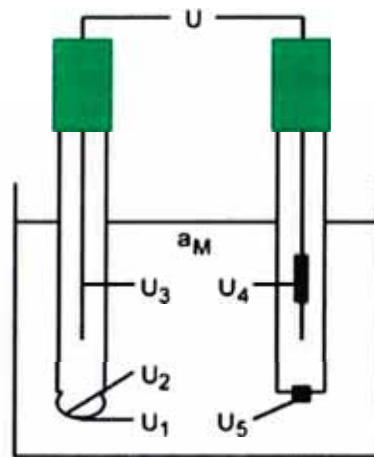


Figura 21: Diagrama esquemático de un electrodo de pH ⁽³⁾
Fuente: Metrohm

Los potenciales U_2 , U_3 y U_4 se pueden mantener constante por una construcción de electrodos adecuado. Las medidas de construcción y la selección de un electrolito de referencia adecuado aseguran que U_5 también se mantiene lo más constante posible. Idealmente el potencial medido debe depender sólo del potencial entre la membrana de vidrio y la solución.

Por razones prácticas, las medio-celdas del electrodo de medición y el electrodo de referencia están contenidas normalmente en un solo electrodo, lo que a continuación se conoce como un combinado electrodo de pH.

En la figura 22 se distingue lo siguiente:

- ✓ Electrodo de medida - electrodo metálico (a la izquierda)

U_1 = potencial redox entre la solución de medición y la superficie de metal.

- ✓ Electrodo de referencia - cloruro de plata / plata (a la derecha)

U_4 = Galvani potencial de electrodo de referencia

U_5 = potencial de membrana (potencial de difusión)

a_M = Actividad de iones medido en solución de la muestra

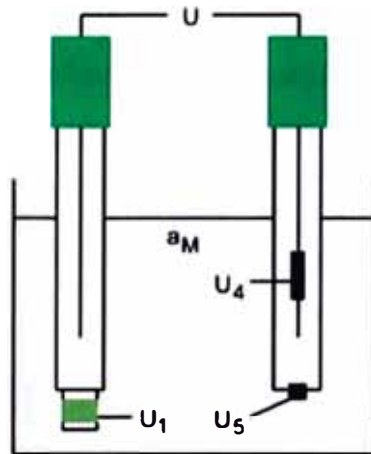


Figura 22: Diagrama esquemático de un electrodo redox⁽³⁾
Fuente: Metrohm

Para los electrodos de metal los potenciales de transición formados de U_2 y U_3 de los electrodos de pH no existen. Según la aplicación particular, puede ser posible utilizar un pH electrodo de vidrio como el electrodo de referencia en lugar de la electrodo de referencia de cloruro de plata / plata. En los electrodos combinados redox y Titrados de Metrohm las medio celdas también están contenidos en un solo electrodo.

2.6.2. Desde el potencial medido hasta la concentración de iones

Como cada ion está rodeado de iones con carga contraria, para hacerlo más sencillo, ya no es tan eficaz la medición como un ion libre (ley de Debye-Hückel). Esto afecta tanto a la reactividad y el tamaño de los potenciales en la medición del electrodo. La actividad de la medición de iones a_M , que es también utilizado en la ecuación de Nernst, está vinculada a la concentración del analito c_M a través de la actividad coeficiente γ :

$$a_M = \gamma * c_M \quad \dots \text{Ec. (1)}$$

Para soluciones diluidas con concentración $c_M \leq 0,001$ mol / L el coeficiente de actividad γ tiende hacia 1 y la actividad del ión corresponde a su concentración como una primera aproximación. γ es una función de la fuerza iónica de la solución de medición.

La relación matemática entre la actividad a_M del ion, medido en la solución de iones y el potencial medido entre el electrodo de referencia y la medición del electrodo se describe por la ecuación de Nernst. Este sólo se aplica para el caso (ideal) en el que un electrodo sólo responde a un solo tipo de iones. Potenciales de U_2 a U_5 para electrodos de pH y U_4 y U_5 para electrodos redox, que son normalmente constante, aparecerá como potencial en U_0 la ecuación de Nernst.

$$U = U_0 + \frac{2.303 * R * T}{z * F} * \log a_M \dots \text{Ec. (2)}$$

Ecuacion de Nernst

U = potencial medido

U_0 = potencial estándar del electrodo dependiente de la temperatura

R = constante de gas en general 8,315 J mol⁻¹ K⁻¹

T = temperatura en Kelvin

z = carga iónica incluyendo el signo

F = constante de Faraday 96.485,3 C mol⁻¹

El término en la ecuación de Nernst en frente del logaritmo es conocido como el potencial de Nernst U_N (también pendiente Nernst o Nernst slope).

$$U = U_0 + \frac{2.303 * R * T}{z * F} \dots \text{Ec. (3)}$$

Potencial de Nernst

Su valor es de 0,059 V a $T = 298,15$ K, $z = 1$. Como un factor en la ecuación de Nernst que representa el teórico pendiente del electrodo. U_N corresponde exactamente a la

alteración en potencial causado por el aumento de la actividad de a_M por un factor de diez. A partir de la ecuación se puede ver que el pendiente del electrodo para electrodos que responden a los iones con una carga doble ($z = 2$) es sólo la mitad del tamaño de que para electrodos de iones con una sola carga ($z = 1$).

Además, el signo de cationes y aniones de medición sensible electrodos es diferente, como z también toma la carga en el iones en cuenta. El potencial de Nernst es dependiente directamente de la temperatura (véase la Ecuación 3). Es por esto que es absolutamente necesario tomar la temperatura en cuenta en todas las mediciones potenciométricas directos, ya que de lo contrario no se obtendrán resultados correctos.

2.6.3. Valor de pH

En la práctica, especialmente cuando se mide el equilibrio ácido / base el término pH, introducido por Sørensen en 1909, se utiliza con frecuencia en lugar de la medición de la actividad de iones a_M :

$$pH = -\log a_{H^+} \dots \text{Ec.}(4)$$

Definición del valor de pH

El valor de pH es el logaritmo negativo común de la actividad del ion hidrógeno de una solución. El término p es con frecuencia utilizado para la presentación simplificada de muy grande o valores pequeños. De una manera similar pNa^+ se puede utilizar para la actividad de iones de sodio, o pKa como constante acida o pKb como constante para las constantes de reacción de base. En cada uno de estos casos lo que se quiere decir es el logaritmo común negativo del valor particular. Si esta definición se inserta en la Ecuación de Nernst entonces obtenemos la medida potencial U:

$$U = U_{\bullet} - \frac{2.303 * R * T}{z * F} * pH \dots \text{Ec.}(5)$$

Valor de pH y de potencial

2.6.4. Potencial REDOX (Electrodos de metal)

En una manera similar a la ecuación de Nernst (Ecuación 2) la ecuación para el potencial dependiente de la actividad es obtenida como sigue:

$$U = U_0 + \frac{2.303 * R * T}{z * F} * \log \frac{a_{ox} * a_{H^+}}{a_{red}} \dots \text{Ec}(6)$$

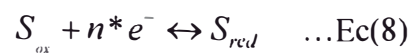
La Ecuación 6 por lo general permite que el potencial generado por un par redox en el electrodo de medición sea calculado. Como los protones están involucrados en la mayoría de las reacciones redox, los potenciales medidos dependen del pH. Si las reacciones de los protones no se pueden excluir entonces, el pH también debe ser determinada o ajustado a un valor definido.

2.7. ELECTRODOS DE METAL

Los electrodos de metal tienen una superficie metálica expuesta. Si los iones de este metal están contenidos en la solución de muestra a continuación un equilibrio se formará en la superficie del metal el cual dependerá de la concentración de los iones metálicos en la solución («Teoría de la doble capa eléctrica»). Los iones metálicos son aceptados por la superficie metálica y al mismo tiempo se libera en la solución.



Este equilibrio dependiente de la concentración se caracteriza por un correspondiente potencial E^0 (potencial Galvani), por ejemplo el equilibrio Ag^+ / Ag en una superficie de plata tiene un valor de $E^0 = 0,7999 \text{ V}$ (25° C). Si la solución de la muestra no contiene iones del metal correspondiente entonces el electrodo de metal todavía puede formar un potencial Galvani si una reacción redox se produce en la solución de muestra.



Si la superficie del electrodo es inerte a la reacción redox, ningún ion metálico se liberará a partir del metal, en este caso la superficie de metal sólo actúa como un catalizador para los electrones. Por ejemplo los electrodos de oro y de platino son en gran medida químicamente inertes, y se utilizan para la medición de potenciales redox. Los electrodos de plata sólo se utilizan como electrodos indicadores para valoraciones.

III. SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS MEDIANTE PC DE LA ETAPA DE TITULACIÓN YODOMÉTRICA

3.1. EQUIPOS Y SOFTWARE USADOS⁽³⁾

A continuación se detalla los equipos y el software propuesto para la automatización de la etapa de titulación yodométrica. Estos equipos de última tecnología son de la marca suiza Metrohm.

3.1.1. Titulador potenciométrico –Titrande 905

El Titrande es la parte central de un sistema modular. El aparato se maneja o bien a través de un Touch Control con una pantalla sensible al tacto (titulador "Stand-alone") o a través de un ordenador con el software correspondiente. Un sistema Titrande puede incluir varios aparatos distintos.

En la Figura 22 se muestra un esquema general de los aparatos periféricos que pueden conectarse al 905 Titrande.

3.1.1.1. Descripción del aparato

905 Titrande presenta las características siguientes:

■ Manejo

El aparato se maneja a través de un Touch Control sensible al tacto o a través de un eficaz programa de PC.

■ Dosificación

Un motor de bureta externo.

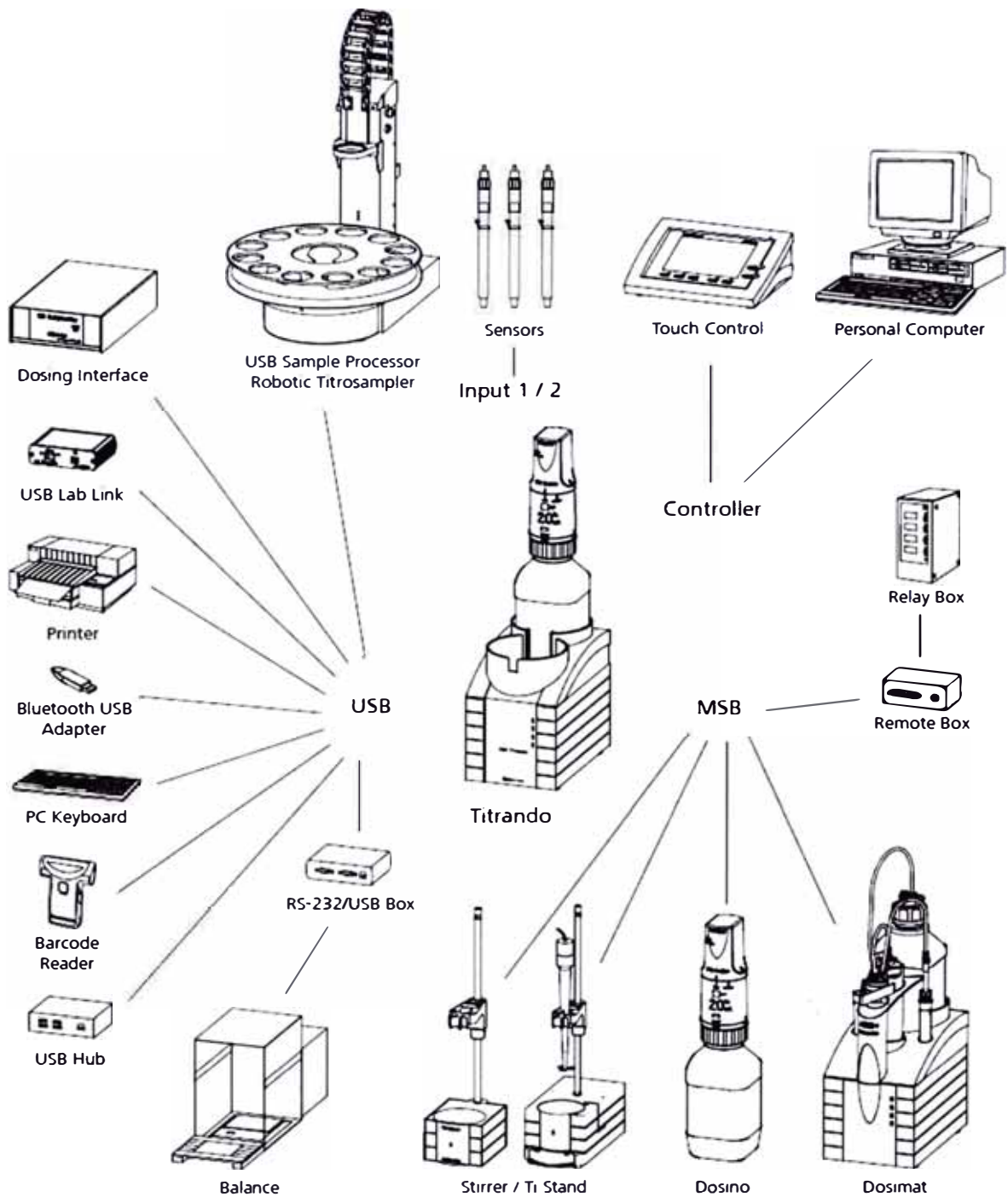


Figura 23: Aparatos periféricos que pueden ser conectados a un titulador Titrande ⁽³⁾
Fuente: Metrohm

■Conectores MSB

Cuatro conectores MSB (Metrohm Serial Bus) para el control de dosificadores (Dosimat con unidad intercambiable o Dosino con unidad de dosificación), agitadores o stands de titración y Remote Boxes.

■Conectores USB

Dos conectores USB que permiten conectar, p. ej., una impresora, un teclado de PC, un lector de código de barras u otros aparatos de control (USB Sample Processor, Titrando, Dosing Interface, etc.).

■Interface de medida

Dependiendo de la versión tiene una o dos interfaces de medida. Un interface de medida incluye una entrada de medida de alta resistencia (Ind.) para electrodos pH, redox o EIS, una entrada de medida (Ref.) para un electrodo de referencia separado, una entrada de medida (Temp.) para sensores de temperatura (Pt1000 o NTC), una entrada de medida (Pol.) para un electrodo polarizable y un conector (iConnect) para un iConnect.

3.1.1.2. Modos de titulación, modos de medida e instrucciones de dosificación.

El aparato soporta los siguientes modos de titulación, modos de medida e instrucciones de dosificación:

■DET

Titulación dinámica a punto de equivalencia. El reactivo se añade en etapas de volumen variables. Como modo de medida se puede seleccionar:

- pH (medida potenciométrica del pH)
- U (medida potenciométrica del voltaje)
- U_{pol} (medida amperométrica con voltaje de polarización seleccionable)
- I_{pol} (medida voltamétrica con corriente de polarización seleccionable)

■MET

Titración monótona a punto de equivalencia. El reactivo se añade en etapas de volumen constantes. Como modo de medida se puede seleccionar:

- pH (medida potenciométrica del pH)
- U (medida potenciométrica del voltaje)
- Upol (medida amperométrica con voltaje de polarización seleccionable)
- Ipol (medida voltamétrica con corriente de polarización seleccionable)

■SET

Titración a punto final con uno o dos puntos finales predefinidos. Como modo de medida se puede seleccionar:

- pH (medida potenciométrica del pH)
- U (medida potenciométrica del voltaje)
- Upol (medida amperométrica con voltaje de polarización seleccionable)
- Ipol (medida voltamétrica con corriente de polarización seleccionable)

■MEAS

Para las medidas pueden seleccionarse los siguientes modos de medida:

- pH (medida potenciométrica del pH)
- U (medida potenciométrica del voltaje)
- Upol (medida amperométrica con voltaje de polarización seleccionable)
- Ipol (medida voltamétrica con corriente de polarización seleccionable)

- Conc (medida de la concentración)
- T (medida de la temperatura)

■STDADD

Los modos de medida para la adición estándar sólo se presentan separados en tiamo. En PC-Control están integrados en el modo de medida MEAS conc. Para las medidas pueden seleccionarse los siguientes modos de medida:

- auto (adición automática del reactivo de adición estándar según una especificación de una diferencia de voltaje)
- dos (adición automática del reactivo de adición estándar según una especificación de cada incremento de volumen)
- man (adición manual del reactivo de adición estándar)

■CAL MEAS

Calibración. Se distinguen los dos modos siguientes:

- pH (calibración de electrodos pH)
- Conc (calibración de electrodos ion-selectivos)

■ELT

Test del electrodo para electrodos pH.

■Instrucciones de dosificación

Se pueden seleccionar las siguientes instrucciones de dosificación:

- ADD (adición de un volumen predefinido)
- LQH (ejecución de tareas de dosificación complejas)
- PREP (lavado de cilindros y tubos de una unidad intercambiable o de dosificación)
- EMPTY (vaciado de cilindros y tubos)

3.1.2. Electrodo de platino

El electrodo utilizado es un electrodo combinado de metal (Pt Titrode), con un anillo de platino, en cuya punta se encuentra la membrana pH de vidrio como electrodo de referencia.

Para valoraciones redox sin modificación del valor de pH, libre de mantenimiento.



Figura 24: Electrodo Pt titrode ⁽³⁾
Fuente: Metrohm

Tabla 2: Especificaciones del electrodo de anillo de platino Pt Titrode⁽³⁾

Unidad de medida	mV
Tipo de electrodo indicador	Pt
Material del eje	Vidrio
Superior Diámetro del eje (mm)	12
Diafragma	-
Rango de medición	-2000 ... 2000
Rango de temperatura a corto plazo (° C)	0 ... 80
SGJ manga	flexibles manga SGJ
Rango de temperatura a largo plazo (° C)	0 ... 80
Enchufe para el llenado de apertura	No
Inferior Diámetro del eje (mm)	12
Min.. profundidad de inmersión (mm)	20
Plug-in Electrodo cabeza	Metrohm cabezal enchufable T
Forma electrodo indicador	Ring / hemisferio

3.1.3. Procesador de muestras

3.1.3.1. 815 Robotic USB Sample Processor XL en el sistema Titrande

815 Robotic USB Sample Processor XL es una parte del sistema modular Titrande. El aparato se maneja o bien a través de un Touch Control con una pantalla táctil (titrador "Stand-alone") o a través de un ordenador con el software correspondiente.

Un sistema Titrande puede incluir varios aparatos de distintos tipos. En la figura 24 se ofrece una visión conjunta de los aparatos periféricos que pueden conectarse a 815 Robotic USB Sample Processor XL.

Con PC Control/Touch Control se pueden controlar hasta 3 aparatos de control (Titrandos, Dosing Interfaces, USB Sample Processors, etc.) mediante una conexión USB. Con el software tiamo, el sistema puede ampliarse a voluntad con otros aparatos de control.

3.1.3.2. Descripción del aparato

815 Robotic USB Sample Processor XL es un aparato multifuncional y versátil. Se concibió para su uso en operaciones y en el laboratorio y ofrece una amplia gama de aplicaciones.

Mediante la incorporación de interfaces de alto rendimiento, se añade de forma sencilla a los sistemas Titrande de Metrohm. De esta forma, las amplias posibilidades de comunicación del sistema Titrande (remote box, conexión LIMS, etc.) pueden utilizarse en su totalidad. Estas capacidades hacen que 815 Robotic USB Sample Processor XL pueda emplearse en toda clase de tareas de automatización de un laboratorio, especialmente en un sistema de datos de laboratorio de elevada integración.

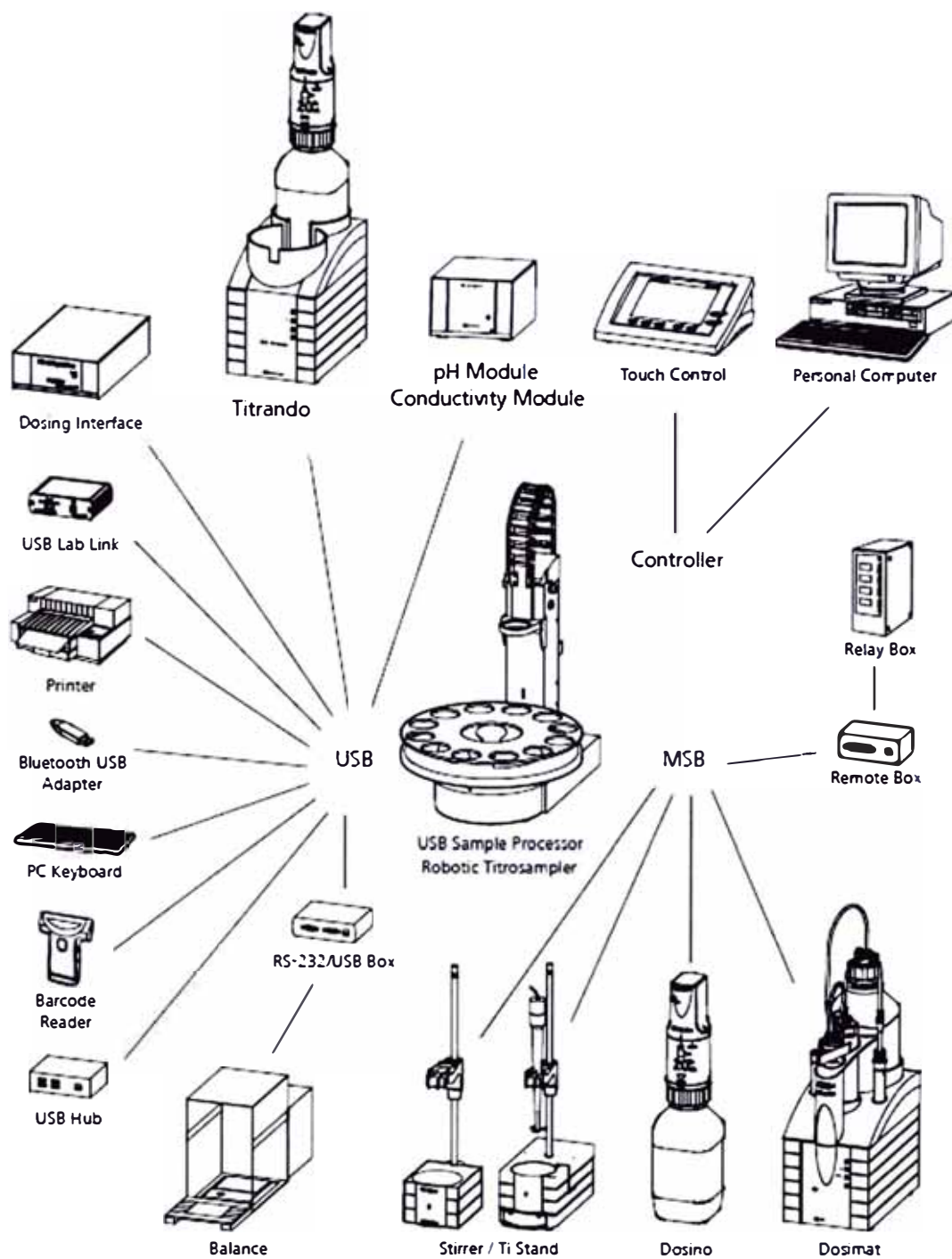


Figura 25: Aparatos periféricos que pueden conectarse a un 815 Sample Processor⁽³⁾
Fuente: Metrohm

La interface de usuario de Touch Control o del software *tiamo*TM garantizan un manejo y programación cómodos de 815 Robotic USB Sample Processor XL. De esta forma, las instrucciones y la gran diversidad de posibilidades de configuración pueden utilizarse de forma eficiente y sencilla. La inclusión en el sistema Titrande garantiza, asimismo, la total conformidad del sistema de automatización con las directrices de la FDA (Federal Drug Administration, por su forma en inglés), especialmente con la directriz 21 CFR parte 11, "Electronic records and signatures". Existen gradillas de muestra estándar intercambiables para muchos tamaños de vaso. Asimismo, se pueden definir posiciones para vasos de lavado o acondicionamiento para cada gradilla, por ejemplo.

Con el montaje de un 786 Swing Head, la cifra de pruebas editables en una gradilla puede aumentar de forma considerable. Los brazos giratorios para 786 Swing Head permiten alcanzar cualquier punto de una gradilla de muestras que se desee. De este modo se pueden elegir prácticamente con total libertad la cantidad (máx. 999 posiciones de gradilla) y la distribución de las muestras.



Figura 26: 815 Robotic USB Sample Processor XL ⁽³⁾
Fuente: Metrohm

3.1.4. Agitador de paletas

3.1.4.1. Descripción del aparato

El agitador de hélice 802 Stirrer se controla mediante un Touch Control o un programa de PC.

Asimismo, dispone de un control propio. La velocidad de agitación se controla con un regulador.

802 Stirrer también puede conectarse a un stand de titración, en la torre de un cambiador de muestras o directamente a un cambiador de muestras.



Figura 27: Agitador de hélice 802 ⁽³⁾
Fuente: Metrohm

3.1.5. Bomba de succión

3.1.5.1. Descripción del aparato

La unidad de bomba 772 es una bomba peristáltica versátil para el transporte o evacuación de medios líquidos. Fue diseñado específicamente para la operación en el medio ambiente de laboratorio, permitiendo una amplia gama de aplicaciones.

A diferencia de las bombas de membrana, bombear disolventes orgánicos o líquidos con contenido de sólidos no es un problema para la unidad de la bomba 772.

Por lo tanto, la unidad de bomba 772 está igualmente bien adaptada para su uso en la titulación, por ejemplo para la evacuación de las muestras de titulación con la

precipitación de haluro de plata y como una bomba de suministro en los sistemas de automatización más grandes. Mediante el uso del adecuado material de las tuberías, se puede controlar una amplia variedad de tareas.

La velocidad de flujo de hasta 600 ml / min abre una amplia gama de aplicaciones.



Figura 28: Unidad de Bomba 772 ⁽³⁾
Fuente: Metrohm

3.1.6. Unidad Dosificadora (Dosino)

800 Dosino es un motor de bureta multifuncional y versátil que puede usarse en distintos aparatos dosificadores o titradores (por ejemplo, Titrando). 800 Dosino y la 807 Dosing Unit correspondiente son adecuados para su uso como bureta para dosificaciones y titulaciones sencillas así como para complejas tareas de automatización y de manejo de líquido, por ejemplo transferencias de muestras o pipeteados.

3.1.6.1. Descripción del aparato

Mediante distintas 807 Dosing Units con cilindros dosificadores de 2, 5, 10, 20 o 50 mL, el 800 Dosino puede insertarse como bureta (motor de bureta o unidad de dosificación) de forma flexible y adaptarse a aplicaciones de distinto tipo. Las unidades de dosificación antiguas (sin chip de datos) también pueden utilizarse.

El reactivo se puede ser cambiado con una pérdida mínima de reactivo, puesto que la construcción de la unidad de dosificación se ha optimizado a un volumen muerto mínimo.

El 800 Dosino y la unidad de dosificación se colocan directamente sobre la botella de reactivo. Una selección de adaptadores de rosca garantiza una colocación óptima en los distintos tipos de botella y rosca. Este montaje implica un gran ahorro de espacio. Puesto que el reactivo se encuentra debajo del motor de bureta, el líquido de vida limitada no puede dañarlo.

En el cambio periódico de reactivo, las unidades de dosificación pueden permanecer montadas en la botella de reactivo. El motor de bureta se retira con una empuñadura y se coloca en la siguiente unidad de dosificación.



Figura 29: 800 Dosino y Unidad de dosificación de 20 mL. ⁽³⁾
Fuente: Metrohm

3.1.7. Software Tiamo (Titration and more)

Tiamo™ es un software de control y base de datos para valoradores y dispositivos de dosificación, así como para la completa automatización del laboratorio, incluyendo los sistemas cliente-servidor. El nombre tiamo™ significa «valoración y más».

Tiamo™ puede hacer algo más que valorar. tiamo™ es una red de titulación (NTDS = Networked Data System titulación). Tiamo™ es el resultado de la innovación tecnológica de la empresa suiza Metrohm, quien con sus numerosas innovaciones, facilidades de uso y la flexibilidad de manejo, tiamo™ ha sido el paquete de software usado para diversos tipos de valoraciones ahora en su nueva versión 2.3.

Entre sus principales características tenemos:


- ✓ Nueva interfaz de software atractivo.
- ✓ Escritorio de libre configuración gracias a su moderno diseño
- ✓ Potente generador de informes
- ✓ Copia de seguridad de base de datos automática
- ✓ Editor de Método gráfico
- ✓ Fácil incorporación de instrumentos y accesorios
- ✓ Software real de base de datos cliente-servidor.
- ✓ Posibilidad de realizar valoraciones paralelas
- ✓ Exportación de datos en XML y otros formatos
- ✓ Función de E-mail para obtener resultados y mensajes
- ✓ Amplia ayuda en línea
- ✓ Administración centralizada de usuarios
- ✓ Trazabilidad completa de todos los resultados
- ✓ Los comandos de método ampliados
- ✓ Desarrollado y validado para cGxP.
- ✓ Funciones de correo electrónico para la base de datos y los métodos de determinación.
- ✓ Numerosas funciones de exportación e importación.





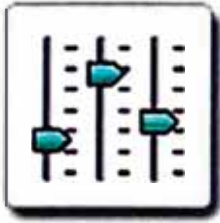
Figura 30: Visualización del escritorio del software Tiamo ⁽³⁾
Fuente: Metrohm

La moderna interfaz de usuario hace que sea fácil familiarizarse con tiamoTM. Todos los comandos y controles se encuentran donde se espera que sean. Uso de la barra principal símbolo tiamoTM puede acceder a la cinco partes del programa de tiamoTM directa y sencilla. Cada parte del programa incluye el menú y las barras de símbolos para el lugar específico de trabajo, así como la ventana principal. Dependiente de cómo haya configurado los derechos de acceso, estos botones pueden ser visibles u ocultos para los usuarios individuales.

Tabla 3: Descripción de los botones de acceso del software Tiamo ⁽³⁾

 <p>Workplace</p>	<p>WORKPLACE</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Hasta cuatro centros de trabajo se pueden abrir al mismo tiempo. ✓ Aquí comienza sus métodos, determinaciones individuales o series de determinaciones ✓ Desde aquí se puede administrar la tabla de muestras ✓ Aquí puede cambiar varios parámetros de valoración « en
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

	<p>vivo », incluso aunque el método está en marcha.</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ En la ventana del método que se puede seguir el progreso de su método en tiempo real. ✓ Los informes de determinación se muestran aquí.
 <p>Database</p>	<p>DATABASE</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Hasta cuatro bases de datos se pueden abrir al mismo tiempo, ✓ Aquí se puede administrar sus bases de datos de las determinaciones. ✓ Amplias posibilidades para el reprocesamiento y la divulgación de los resultados. ✓ Funciones de filtro y búsqueda exhaustiva, así como las funciones de exportación e importación ✓ Amplia información sobre las diversas determinaciones ✓ Las funciones de copia de seguridad manual y automática.
 <p>Method</p>	<p>METHOD</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Hasta nueve métodos se pueden abrir al mismo tiempo, y hasta dos métodos pueden ser desplegado y procesados al mismo tiempo. ✓ Aquí se pueden desarrollar y gestionar los métodos. ✓ Amplia fuente de plantillas de métodos y cálculo. ✓ Funciones de apoyo extensas para el desarrollo de métodos.



Configuration

CONFIGURATION

- ✓ Incluye los menús y barras de símbolos para el lugar específico de trabajo, así como la ventana principal, en la que seis sub-ventanas se pueden mostrar
- ✓ Aquí se puede administrar instrumentos, soluciones valorantes, los sensores y la variable comunes.
- ✓ Aquí se configuran todos los parámetros no específicos del método
- ✓ Para todas las unidades gestionadas aquí, diversas funciones de vigilancia e intervalos de pruebas GLP se pueden establecer
- ✓ Aquí se configura la administración de usuarios, la configuración de seguridad y administración del programa.



Manual

- ✓ Con este botón se abre la interfaz de usuario de una ventana externa para el control manual de todos implementado componentes (Titrandos, agitadores, bombas, etc)
- ✓ Amplias posibilidades para la operación directa sin instrucciones predefinidas: medición directa y la dosificación son tan posible como el control directo de los procesadores de muestras e interfaces remotas.

3.1.8. Configuración usada para la titulación automatizada en la Sociedad Minera Cerro Verde

Para la automatización de la etapa de titulación de las soluciones de concentrado de cobre en el laboratorio químico de la Sociedad Minera Cerro Verde se usaron los siguientes equipos:

- 1.- Titrandos 905
- 2.- Unidad de bomba 772
- 3.- Agitador de hélice 802
- 3.- 815 Sample Procesor (34 posiciones de vasos de 150mL)
- 4.- Dosinos y Unidades de dosificación de 50 mL
- 5.- Software Tiamo 2.3
- 6.- Electrodo Pt Titrode



Figura 31: Fotografía de equipos para titulación potenciométrica instalados en el laboratorio químico de la Sociedad Minera Cerro Verde.

Fuente: Sociedad Minera Cerro Verde

3.2. MÉTODO USADO EN EL SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS MEDIANTE PC PARA REALIZAR LA ETAPA DE TITULACIÓN

3.2.1. Elección de los parámetros principales de la titulación.

Al crear a través del software tiamo™ el método a seguir en la titulación potenciométrica automatizada, es muy importante definir los siguientes parámetros:

a) Parámetros generales

1° Nombre del dispositivo a usar: Para el caso del presente informe: 905

2° Tipo de Dispositivo: Titrande 905

3° Dispositivo de dosificación de la solución titulante: Dosino en el $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$

4° Tipo de sensor: Electrodo de Metal

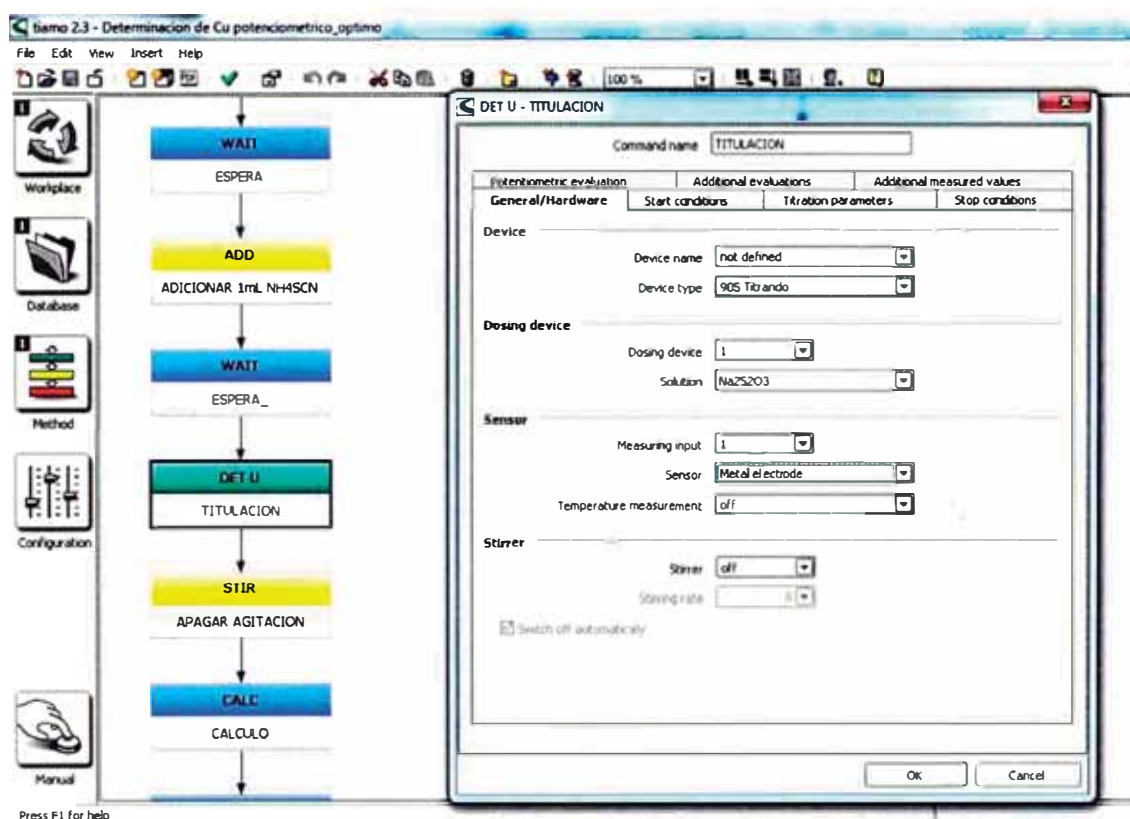


Figura 32: Captura de pantalla del escritorio del software Tiamo, visualizando los parámetros generales de titulación

Fuente: Sociedad Minera Cerro Verde

b) Condiciones de partida

1° Valor medido Inicial: Si es de necesidad del usuario el software puede realizar una lectura inicial del parámetro requerido en la muestra, de acuerdo a la disponibilidad.

2° Volumen de partida: Si es de necesidad del usuario, se puede agregar un volumen definido, menor al volumen gastado en el punto de equivalencia y dejar un pequeño tiempo prudente para la homogenización de la muestra y que se produzca las reacciones pertinentes; pudiendo así acelerar el proceso de titulación.

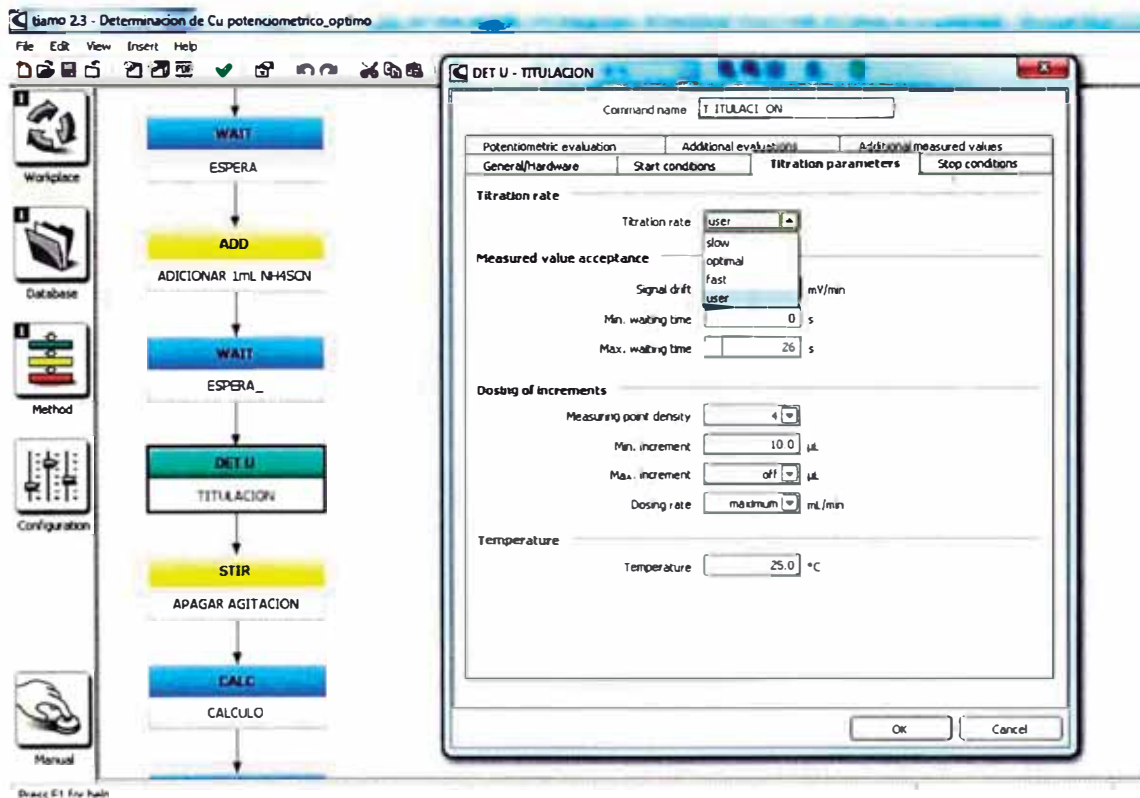


Figura 33: Captura de pantalla del escritorio del software Tiamo, visualizando los parámetros principales de titulación
Fuente: Sociedad Minera Cerro Verde

c) Parámetros principales de titulación

1° Velocidad de titulación: El usuario puede definir la velocidad de titulación deseada eligiendo entre rápida, lenta, óptima o definida por el usuario.

2° Valor de aceptación de medida: Este parámetro permite al usuario definir la velocidad de cambio del potencial (mV/min).

3° Incrementos de dosificación: Esta opción le da la posibilidad al usuario a definir cuál será el mínimo incremento de volúmen que dosificará el equipo al momento de titular, lo cual permitirá tener un mayor o menor número de puntos para tener mayor exactitud en el resultado.

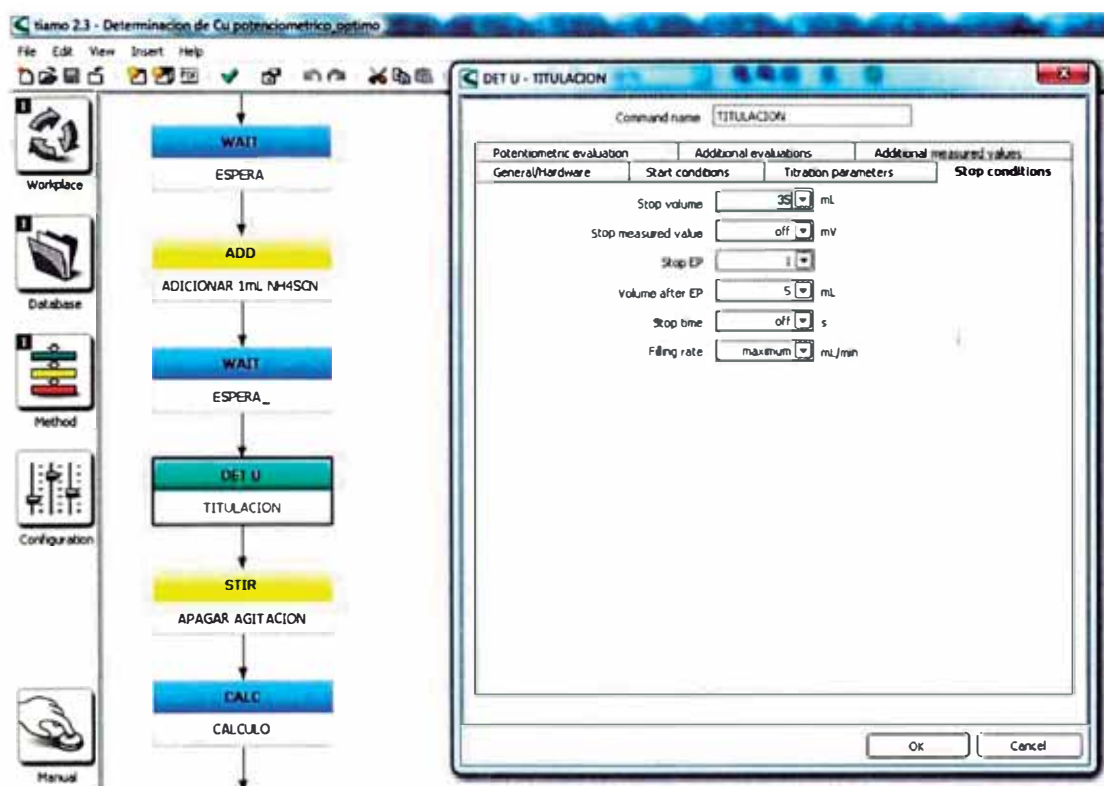


Figura 34: Captura de pantalla del escritorio del software Tiamo, visualizando las condiciones de parada

Fuente: Sociedad Minera Cerro Verde

d) Condiciones de parada

1° Volúmen de parada: El usuario puede definir con éste parámetro hasta qué volúmen se va a dosificar para terminar la titulación.

2° Valor de medida de parada: Si es de elección del usuario se puede definir un valor de potencial en el cual se desea parar la titulación.

3° Punto de equivalencia de parada: El usuario puede definir si desea que el equipo continúe titulando hasta encontrar un máximo de 9 puntos de equivalencia de ser el caso, o que pare la titulación al encontrar 1,2,3, ... o 9 puntos.

4° Volumen después del punto de equivalencia: Este parámetro permite al usuario definir que el equipo dosifique un volúmen adicional luego de encontrar el punto de equivalencia final, logrando así tener una mejor gráfica de la titulación.

5°Tiempo de parada: Permite al usuario definir que la titulación se detenga al cabo de un tiempo fijado.

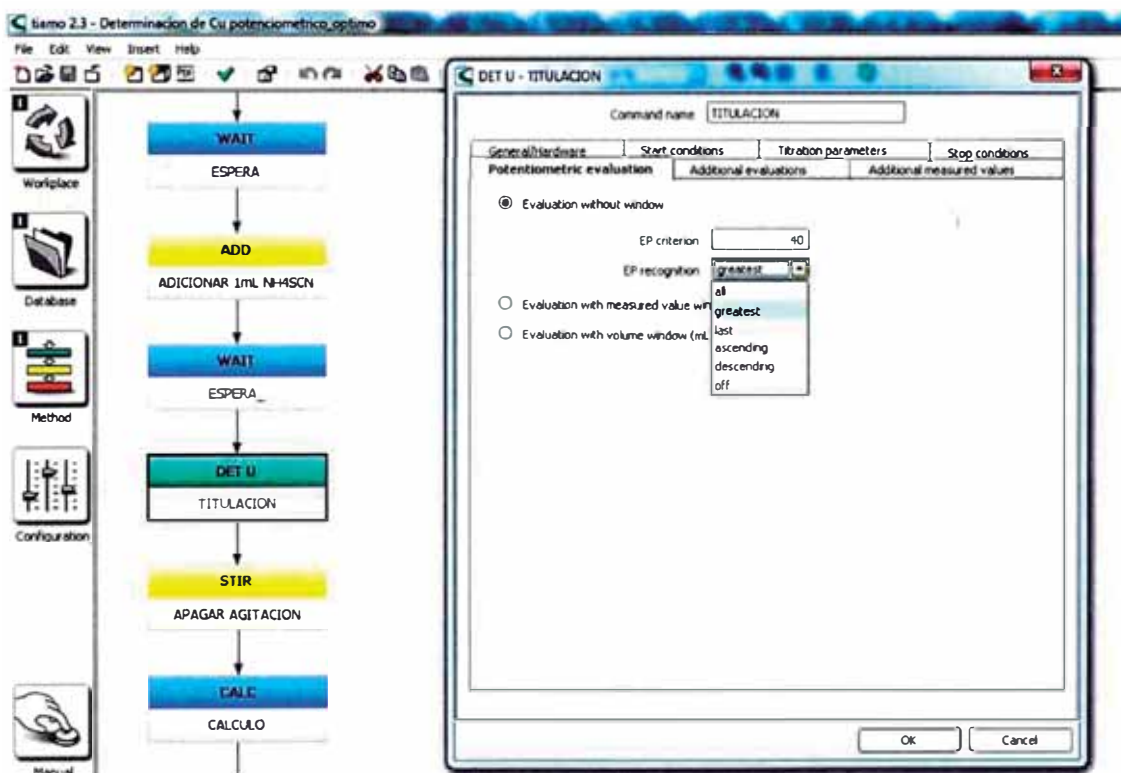


Figura 35: Captura de pantalla del escritorio del software Tiamo, visualizando los parámetros de evaluación potenciométrica

Fuente: Sociedad Minera Cerro Verde

e) Evaluación potenciométrica

1° EP Criterion: Este valor que va desde 0 a 200, permite al usuario definir un valor dado que si el valor de la segunda derivada es menor a este , no lo reconozca como un EP y continúe titulando, permitiendo así reconocer el verdadero EP y no un ruido.

2° EP recognition: Esta opción permite al usuario elegir entre todos, el último o el más grande de los valores de EP según su valor de la segunda derivada.

3.2.2. Método de titulación usado en SMCV

La secuencia del método de titulación potenciométrica automatizado usado en SMCV es el siguiente:

1° El brazo robótico se posiciona en el vaso de muestra indicado

2° las puntas dosificadoras junto con el electrodo y el agitador bajan a la posición de trabajo.

3° Se inicia una agitación

4° Se adiciona 10 ml de KI

5° Se espera unos segundos

6° Se adiciona luego 1 ml de NH_4SCN

7° Esperar unos segundos para homogenizar y reaccionen los reactivos adicionados.

8° Luego el equipo continúa con la titulación con $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ hasta encontrar el punto de equivalencia.

9° Luego procede con los cálculos de los valores deseados usando el volumen de gasto hasta el punto de equivalencia.

10° Emite un reporte de resultados

11° Almacena los resultados en la base de datos del software.

12° Finalmente drena la solución resultante, lava el vaso y el electrodo con agua y pasa al siguiente vaso de muestra.

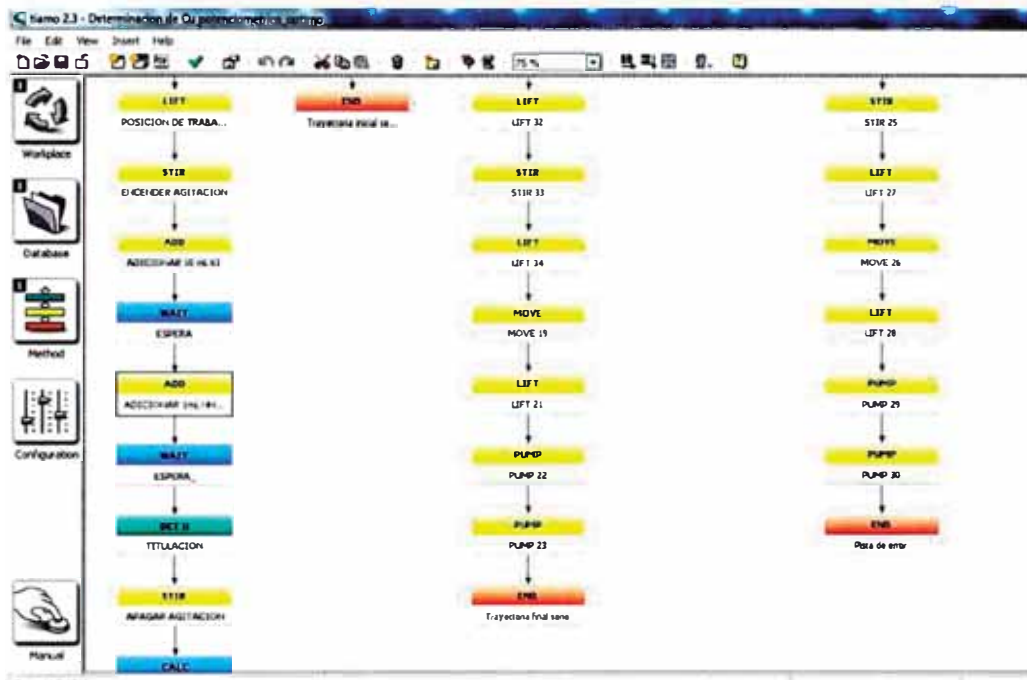


Figura 36: Captura de pantalla del escritorio del software Tiamo, visualizando el método usado en la titulación en SMCV
Fuente: Sociedad Minera Cerro Verde

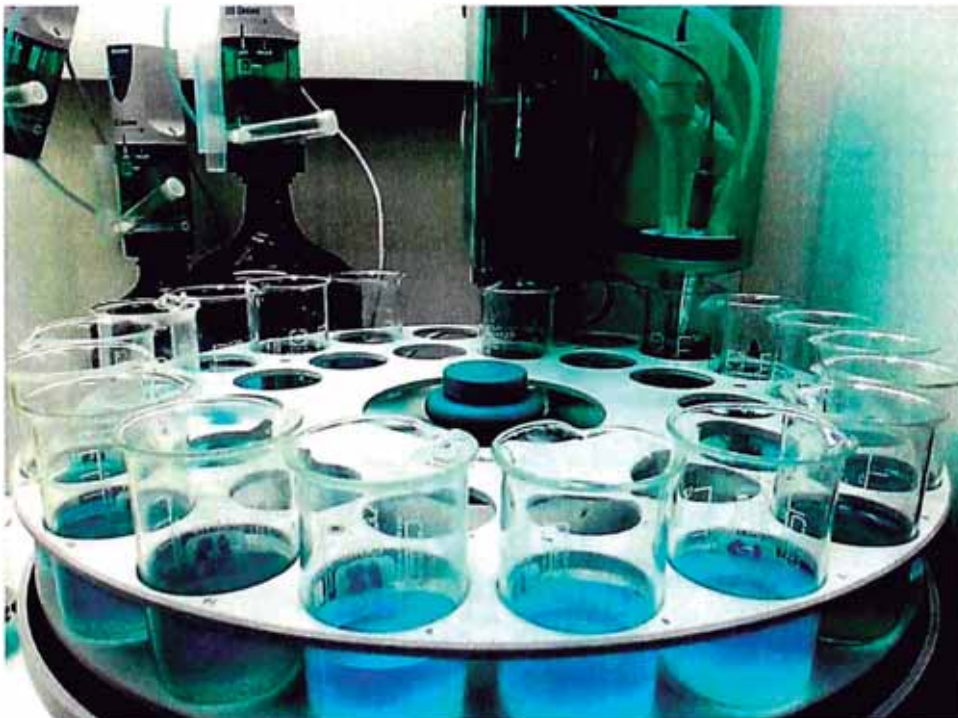


Figura 37: Fotografía tomada durante la titulación de las soluciones de muestras en el laboratorio químico en SMCV
Fuente: Sociedad Minera Cerro Verde

3.3. OBTENCIÓN Y TRATAMIENTO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON EL SOFTWARE

3.3.1. Visualización de resultados

El criterio de reconocimiento del punto de equivalencia del software es por la metodología de la segunda derivada, la cual se puede visualizar en tiempo real mientras se realiza la titulación. En la figura 36 se puede observar la gráfica del avance de la titulación respecto al gasto (color azul) y la gráfica de la segunda derivada (color rosado), la cual forma un pico en donde se halla el punto de equivalencia.

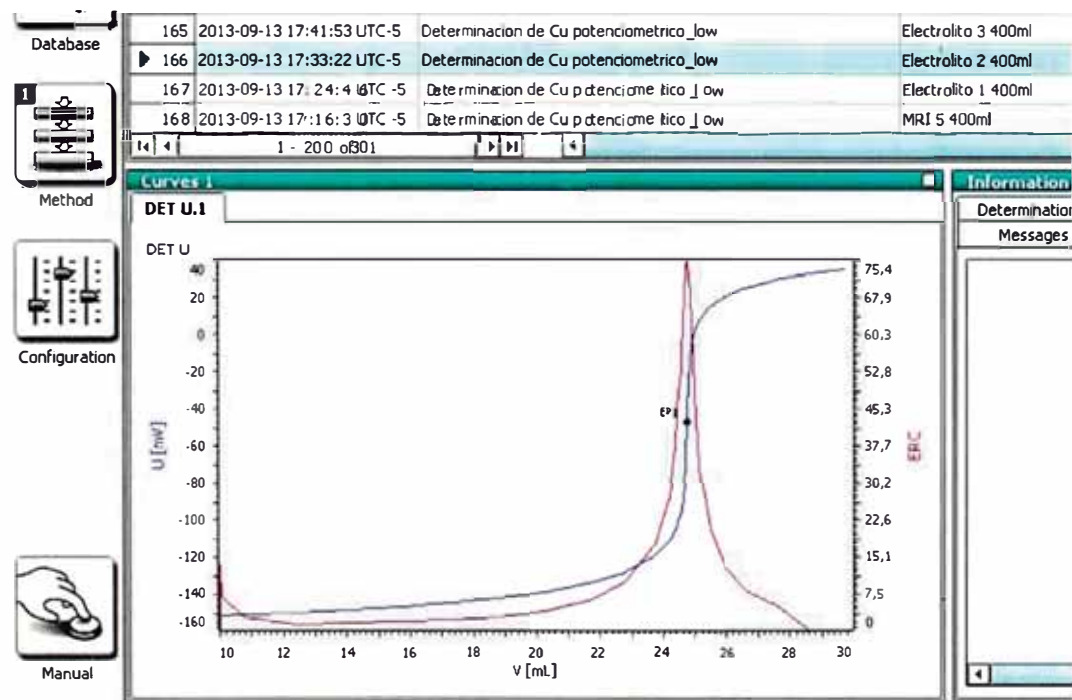


Figura 38: Captura de pantalla del resultado obtenido con el software de una muestra de solución de concentrado.

Fuente: Sociedad Minera Cerro Verde

Así también, al término de la titulación en la pantalla del software se mostrará el resultado inmediatamente. Se podrá observar quien fue el usuario que realizó la determinación, la fecha y hora, el tiempo que duró la titulación de la muestra generándose un reporte y almacenándose en la base de datos, tal como se puede apreciar en la figura 39.

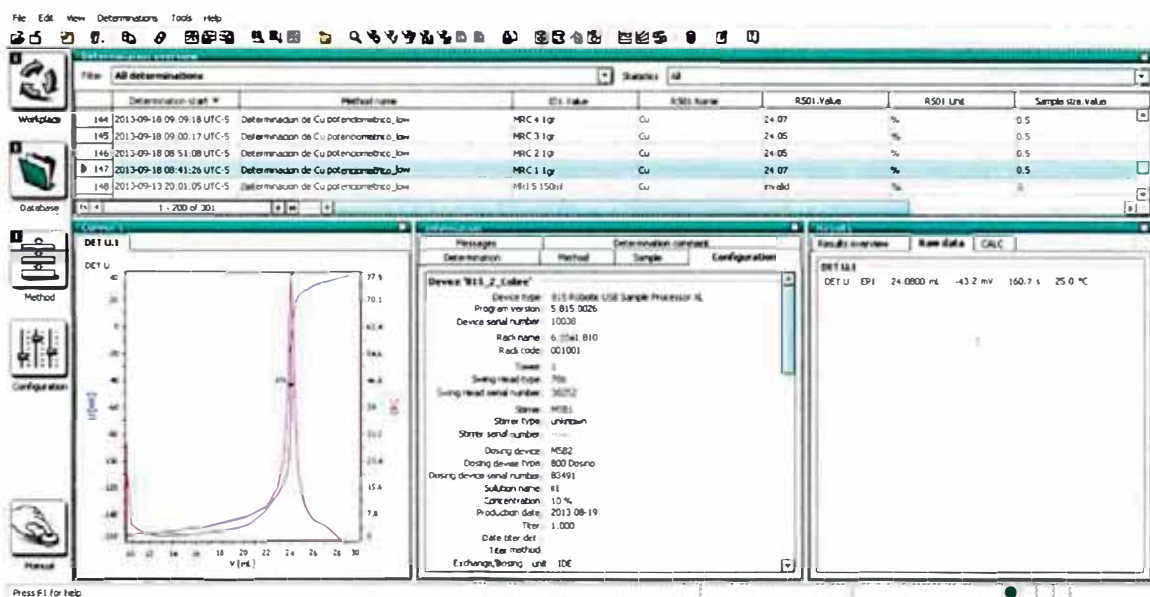


Figura 39: Captura de pantalla de los resultados obtenidos al término de una titulación
Fuente: Sociedad Minera Cerro Verde

3.3.2. Tratamiento de datos

Al término de todas las determinaciones, teniendo guardados los resultados automáticamente en el software, el usuario puede visualizarlos pudiendo realizar el descarte de uno o más de ellos, de notar que se aleja de la tendencia. Así también puede enviar los resultados a través de LIMS interno para tener almacenado los resultados y poder ser trabajados desde el área que los necesite.

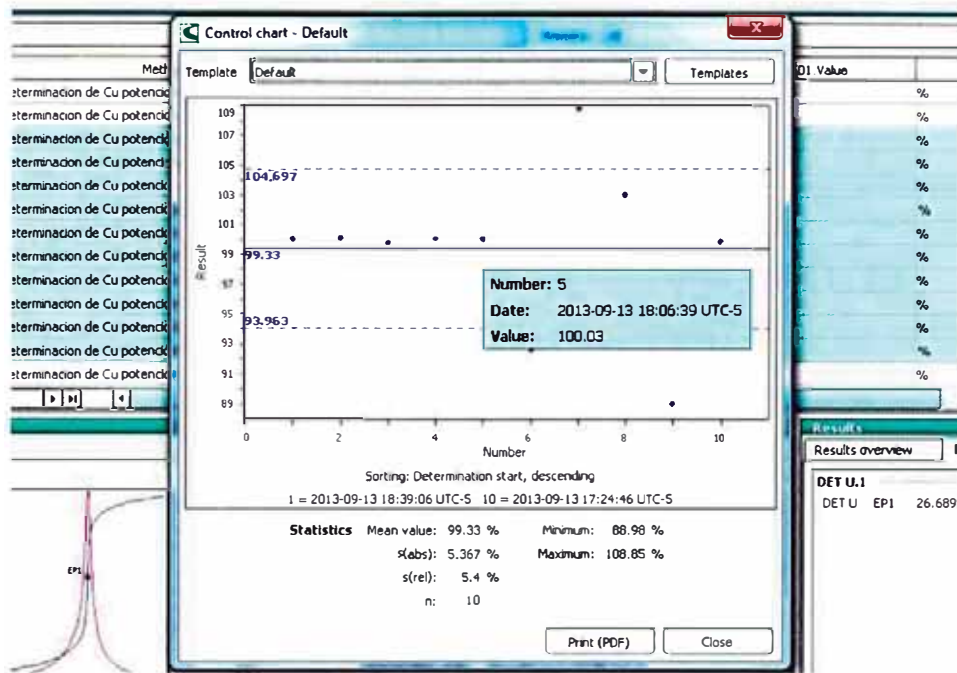


Figura 40: Captura de pantalla la tendencia de los resultados obtenidos y las estadísticas.

Fuente: Sociedad Minera Cerro Verde

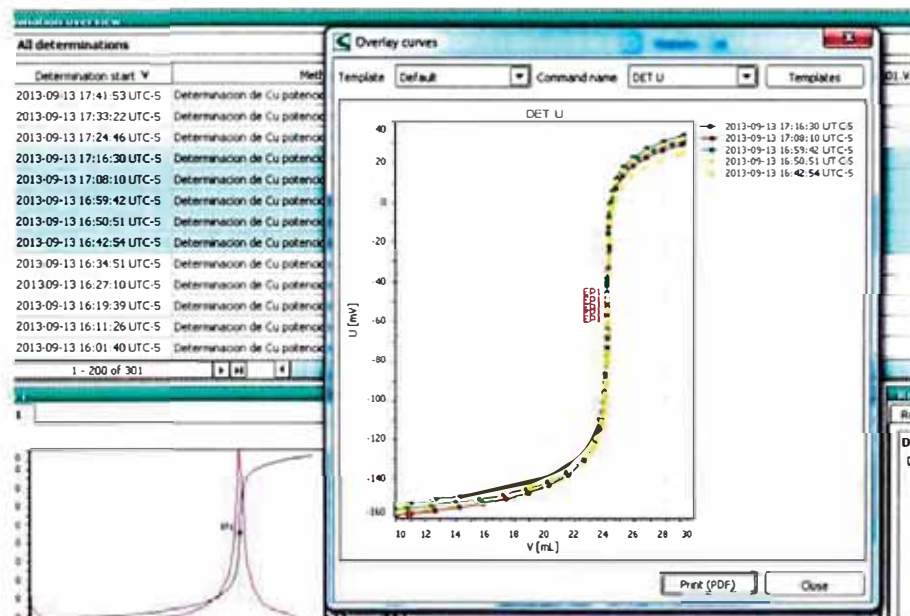


Figura 41: Captura de pantalla donde se muestra la reproducibilidad de los resultados.

Fuente: Sociedad Minera Cerro Verde

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

1. El ahorro de tiempo en el análisis con un equipo automatizado es relevante cuando se tiene un gran número de muestras a analizar, dado que en un tiempo de entre dos a tres minutos que dura una titulación, no solamente el equipo ha realizado la titulación, sino que además ha realizado los cálculos y reportado el resultado, ha lavado el electrodo y el vaso de titulación, y ha vuelto a rellenar todas las buretas (Dosinos) dejando listo el equipo para el siguiente análisis.
2. La importancia del uso de un equipo titulador potenciométrico automático radica en que el sensor con el cual se realiza la determinación potenciométrica presenta una sensibilidad mayor a la que tendríamos con un análisis tradicional en el que el sensor es el ojo humano.
3. La reducción de reactivos es significativa, dado que se tienen límites de dosificación en términos de microlitros, dado que un Dosino divide su dosificación en 10000 pasos; dándonos un mínimo de dosificación de 5 microlitros.
4. La importancia del uso de un electrodo como sensor es que no se está detectando el punto final de titulación, el cual implica un exceso en titulante para lograr el viraje de color; si no encontrar el verdadero punto de equivalencia.
5. No es necesario la adición del almidón poco antes de llegar al punto de equivalencia, dado que la determinación del punto final no es por reconocimiento de cambio de color, si no por medición de potencial.
6. Con la implementación de este equipo propuesto se eliminarían los errores humanos en la obtención de resultados, ya que el equipo podrá trabajar sin parar y seguir reportando los resultados de la misma forma de cuando empezó, dado que no existe el factor cansancio que si afecta al ser humano.
7. Los resultados son reportados y enviados a lims automáticamente, lo cual evita demora en el tiempo de tomar nota y procesar los datos en otras hojas de cálculo.
8. Dado que el software permite hacer estadística de los datos , no es necesario exportar los datos a otro software para obtener estas informaciones.

4.2. Recomendaciones

1. El uso de un electrodo de platino como electrodo indicador implica realizar un mantenimiento de éste con la frecuencia necesaria según su uso, para asegurar la durabilidad del sensor.
2. Se recomienda no realizar la limpieza directa del electrodo con franela o cualquier otro material que pueda causar carga estática en su superficie e interferir en los resultados.
3. Es importante mantener guardado el electrodo en agua destilada, manteniendo así la membrana de vidrio siempre humectada
4. Este equipo puede ser usado en los distintos laboratorios químicos y de servicios que deseen realizar sus determinaciones con mayor rapidez y trabajar mayor cantidad de muestras al día.

V. REFERENCIAS

1. Codelco Educa; ¿Qué es el cobre?; Página Web de la empresa Codelco; Fecha de consulta: Mayo 25 del 2013 y Junio 27 del 2013.
<https://www.codelcoeduca.cl/>
2. Harris, D. ;“Análisis químico cuantitativo”, Grupo Editorial Ibero Americana 1992; 3ra Edición; Páginas: 399-403-406
3. Metrohm Application Literature; Página web de la empresa Metrohm, Fecha de consulta: Abril 15 del 2013, Mayo 20 del 2013.
<http://www.metrohm.com>
4. Mineral Commodity Summaries 2013; United States Geological Survey; Fecha de consulta: Marzo 20 del 2013, Junio 25 y 26 del 2013;
<http://minerals.usgs.gov/minerals/>
5. Operaciones cobre Perú; Informe de sostenibilidad 2012; Página web de la empresa Xstrata Copper ; Fecha de consulta: Marzo 15 del 2013.
<http://www.xstratacopperperu.pe>
6. Proceso productivo del cobre; Página web de la empresa Southernperu; Fecha de Consulta: Junio 25 del 2013 y julio 5 del 2013.
<http://www.southernperu.com>
7. Skoog D.A., West D.M., Holler ;“Química Analítica”, 6ª Edición, Editorial Mc Graw Hill, 1995.;Páginas: 237-256

8. Thomas Keller; ¿Perú Destronará A Chile En Producción De Cobre?: País Vecino Se Ve Amenazado Por Crecientes Costos; Página web de la revista Rumbo minero; Fecha de consulta: Mayo 20 del 2013.

<http://www.rumbominero.com>

9. Worldwide operations; Cerro verde Mine; Pagina web de la empresa Freeport-McMoran – Copper and Gold; Fecha de consulta: Junio 27 del 2013, Julio 5 ,6 y 7 del 2013.

http://www.fcx.com/operations/Peru_Arequipa.htm