

# Webinar de Fundiciones y Refinerías



*Patrocinado por:*

**CESCO**  
CENTRO DE ESTUDIOS  
DEL COBRE Y LA MINERÍA

*Auspiciado por:*

**TRANSCARGO**

**ASC**  
Ingeniería

**TRV**  
RUPERTO VASQUEZ ESTAY  
SERVICIOS INTEGRALES PARA LA MINERÍA



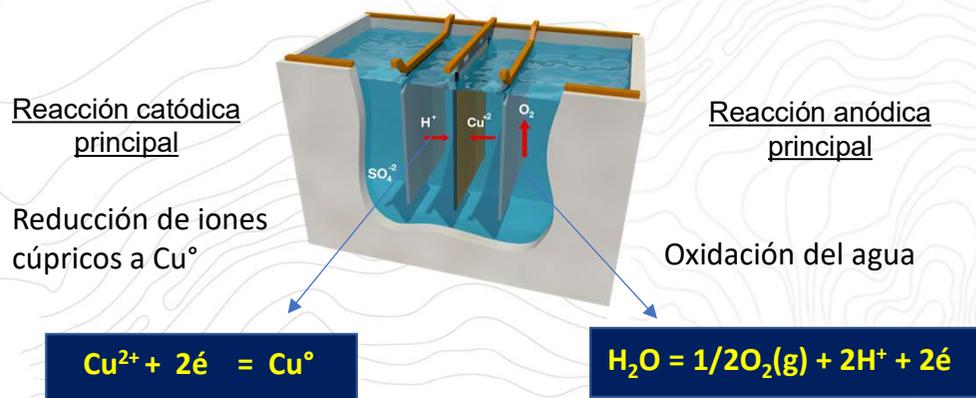
# USO DE SEÑALES ELÉCTRICAS SUPERPUESTAS (DC+AC) EN PROCESOS DE EW Y ER DE COBRE

Christian H. Hecker Cartes  
Asesor Electroquímico

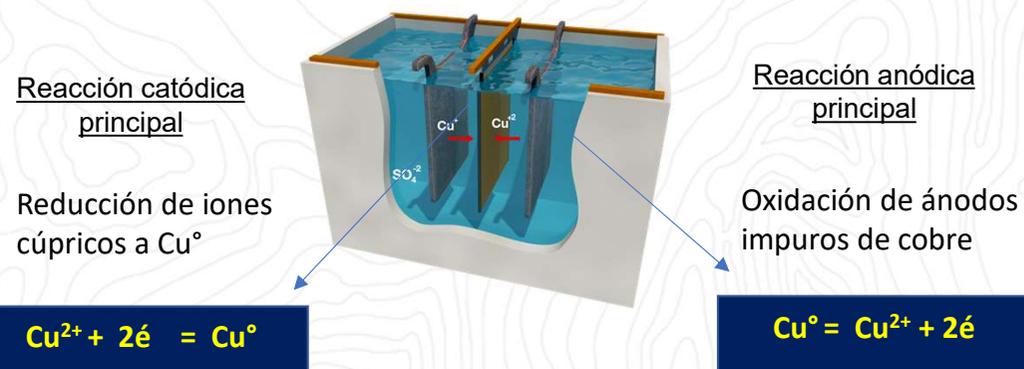
Elektrochemie SpA

## LOS PROCESOS DE ER Y EW DE COBRE

### Electro Obtención de Cobre (EW)



### Electro Refinación de Cobre (ER)

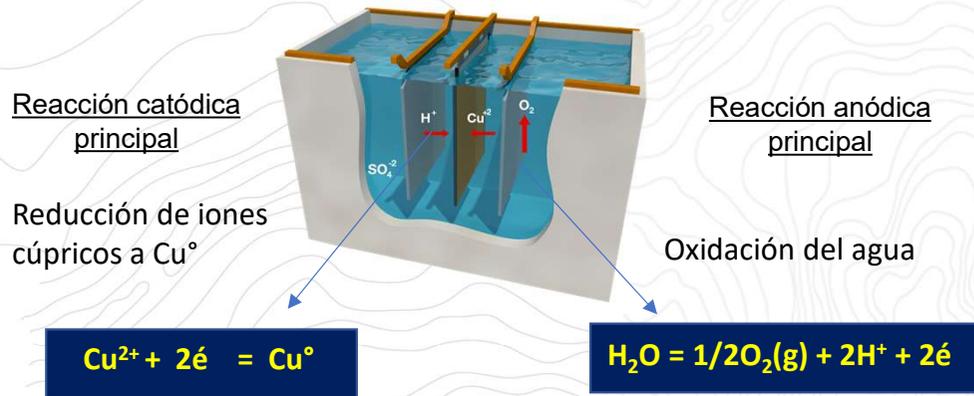


### Lo que diferencia a los procesos de EW y ER de Cu

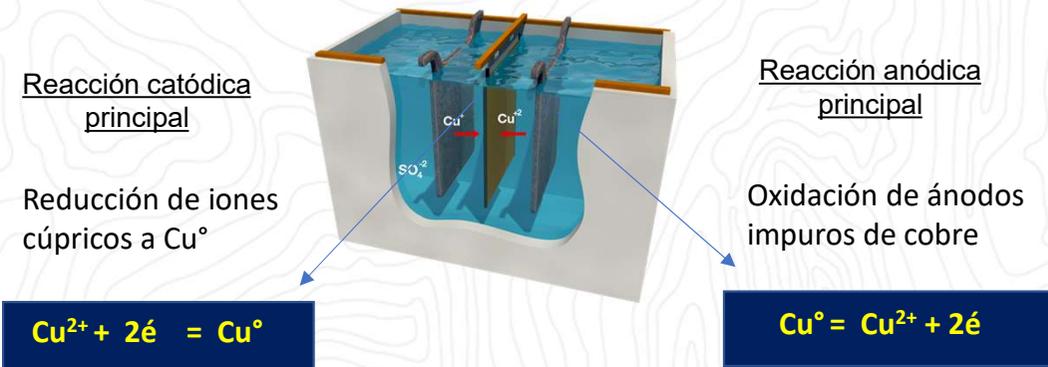
- En ER de Cu, el Cu<sup>2+</sup> a electro depositar en los cátodos se **obtiene de la oxidación de los ánodos** provenientes de la Fundición
- En EW de Cu**, el Cu<sup>2+</sup> a electro depositar lo **extrae del electrolito** proveniente de etapas de LX y SX.
- En ER de Cu, se utilizan **ánodos de Cu** que transfieren, por oxidación, iones cúpricos y otras impurezas al electrolito. La reacción anódica principal es la oxidación de Cu°.
- En EW de Cu**, se emplean **ánodos insolubles de Pb-Ca-Sn** y la reacción anódica principal es la oxidación del agua contenida en el electrolito.
- A igual corriente impuesta, en ER de Cu **el potencial de celda está comprendido entre 250 y 500 mV**. En una **EW de Cu** en cambio, **el potencial de celda es superior ≥ 1800 mV**

## LOS PROCESOS DE ER Y EW DE COBRE

### Electro Obtención de Cobre (EW)



### Electro Refinación de Cobre (ER)

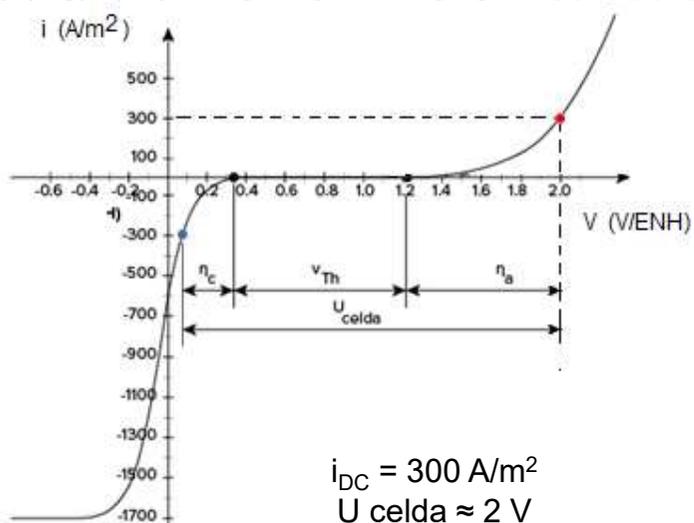


#### Lo que tienen en común los procesos de EW y ER de Cu

- Ambos procesos producen cátodos de **cobre de elevada pureza**
- Tanto la EW como la ER de Cobre, (esta última, en la mayoría de los casos), operan con señales de corriente continua
- Operando con señales de corriente continua, **los ánodos de ER y de EW de Cu pueden y suelen pasivarse bajo ciertas condiciones operacionales**
- En una **EW de Cu el producto de la pasivación anódica es PbSO<sub>4</sub> cristalino (cascarillas no conductoras eléctricas)** que se desprenden de los ánodos y caen al fondo de las celdas (**borra de Pb**)
- En una ER de Cu el **producto de la pasivación anódica es CuSO<sub>4</sub> y/o Cu<sub>2</sub>O que forman un precipitado muy adherente y exento de porosidades, bloqueando la disolución anódica del Cu**

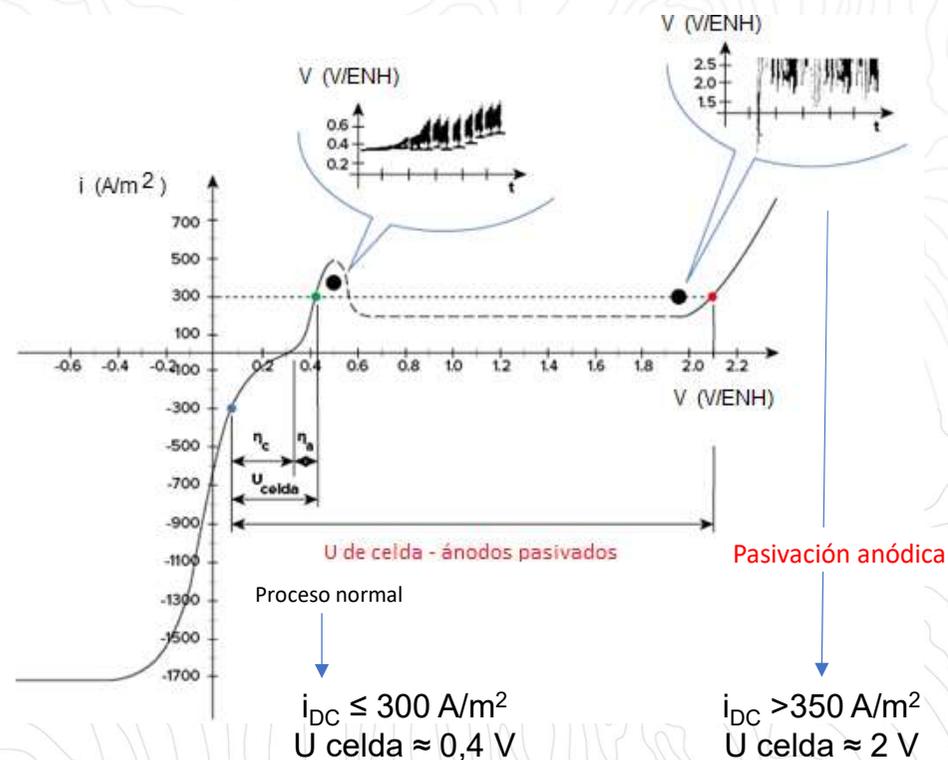
# CINÉTICA DE LOS PROCESOS DE EW Y ER DE COBRE

## (A) Proceso de EW de Cu



$I_{DC}$

## (B) Proceso de ER de Cu

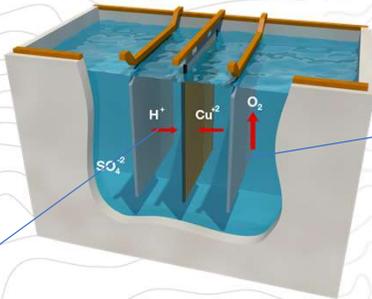


I.P.C. (P.R.C)

## Electro Obtención de Cobre (EW)

Reacción catódica principal

Reducción de iones cúpricos a  $Cu^0$



Reacción anódica principal

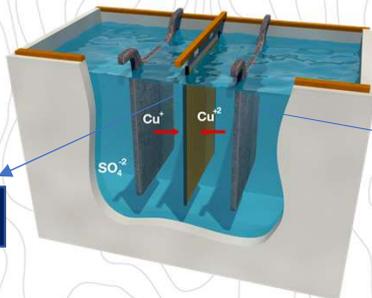
Oxidación del agua



## Electro Refinación de Cobre (ER)

Reacción catódica principal

Reducción de iones cúpricos a  $Cu^0$

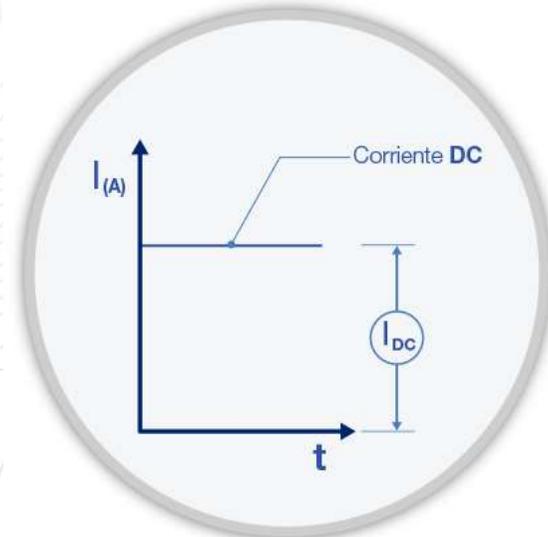


Reacción anódica principal

Oxidación de ánodos impuros de cobre



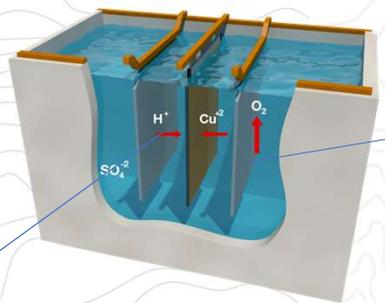
Tecnología Actual  
Corriente DC



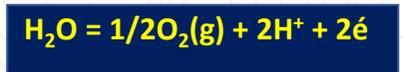
$$I = I_{DC}$$

# Tecnología DC+AC: Superposición de Corriente

## Electro Obtención de Cobre (EW)



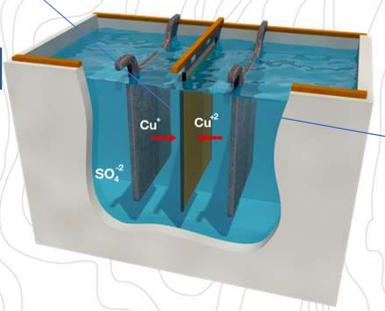
Oxidación del agua



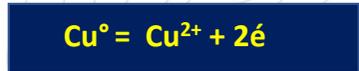
Reducción de iones cúpricos a  $\text{Cu}^0$



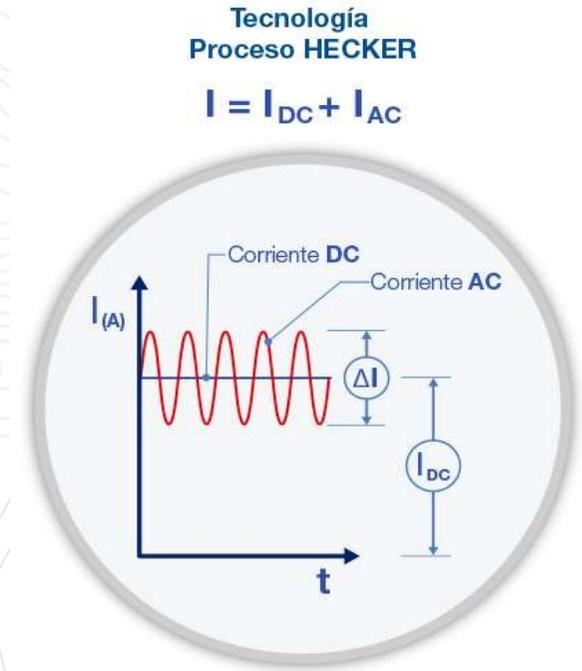
## Electro Refinación de Cobre (ER)



Oxidación de ánodos impuros de cobre



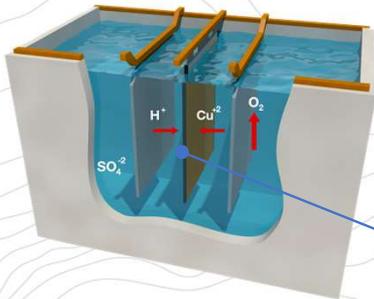
Reducción de iones cúpricos a  $\text{Cu}^0$



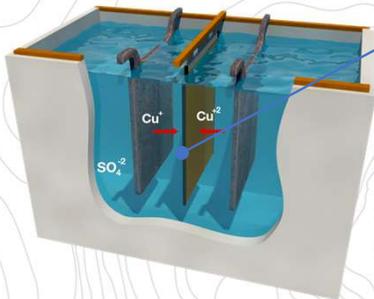
$$I = I_{\text{DC}} + \Delta I \sin(\omega t)$$

## Fenomenología de la interfaz cátodo electrolito

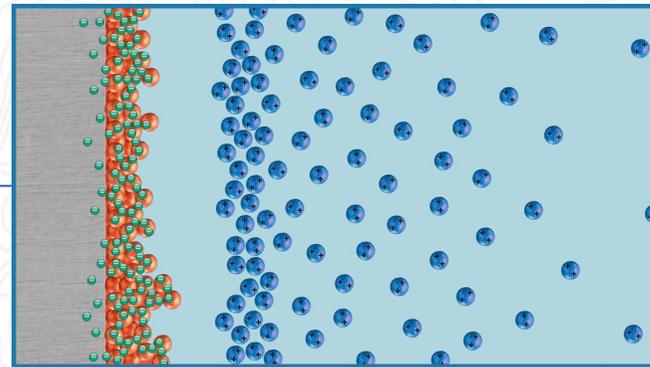
Electro Obtención (Cu EW)



Electro Refinación (Cu ER)



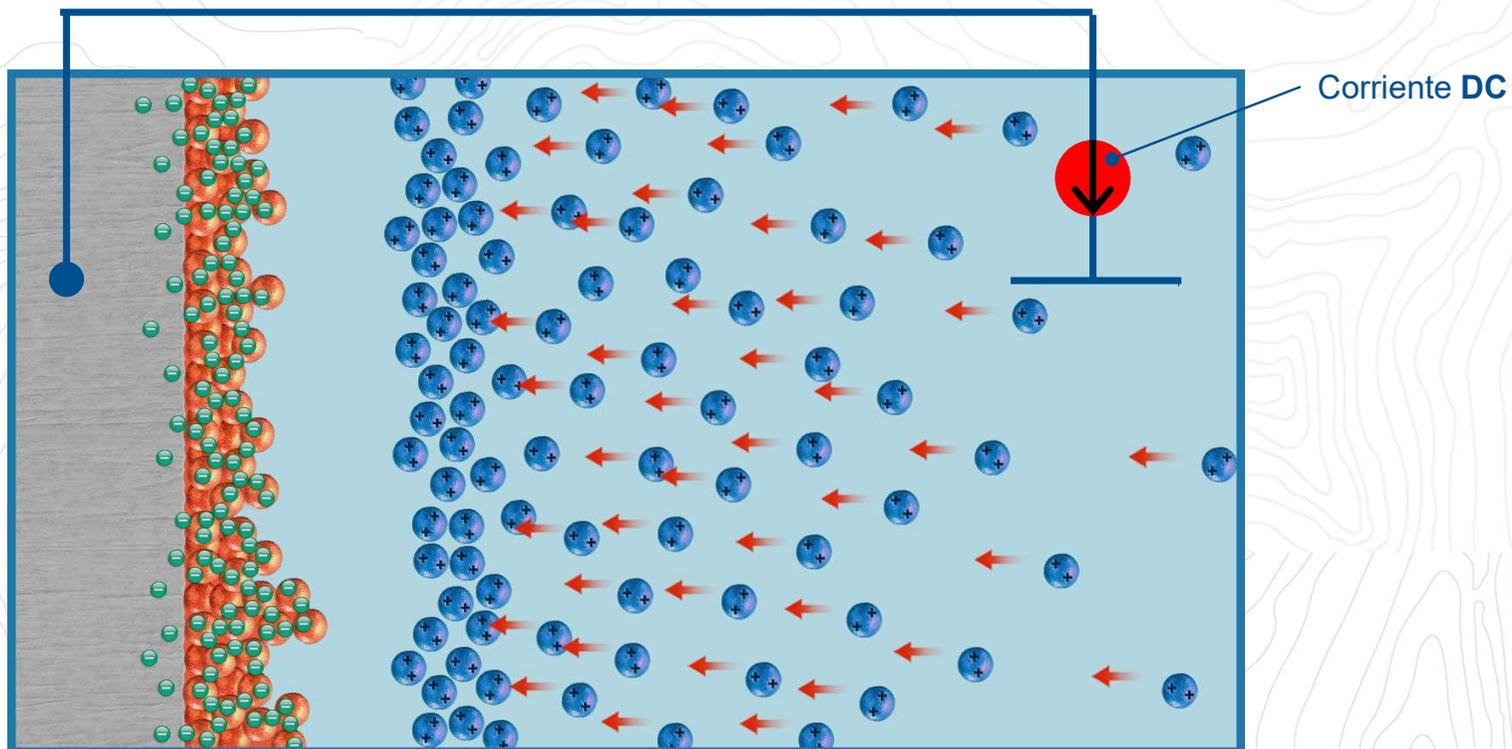
La doble capa electroquímica (planos de Helmholtz) y la capa difusa o plano de Stern



N°	Detalle
1	Cátodo
2	Doble capa electroquímica o Capa de Helmholtz
3	Capa difusa o plano de Stern
4	Seno de la solución - Bulk

# MODELACIÓN DE LA INTERFAZ

## PROCESO CONVENCIONAL DE ELECTRODEPOSITACIÓN: $I_{DC}$

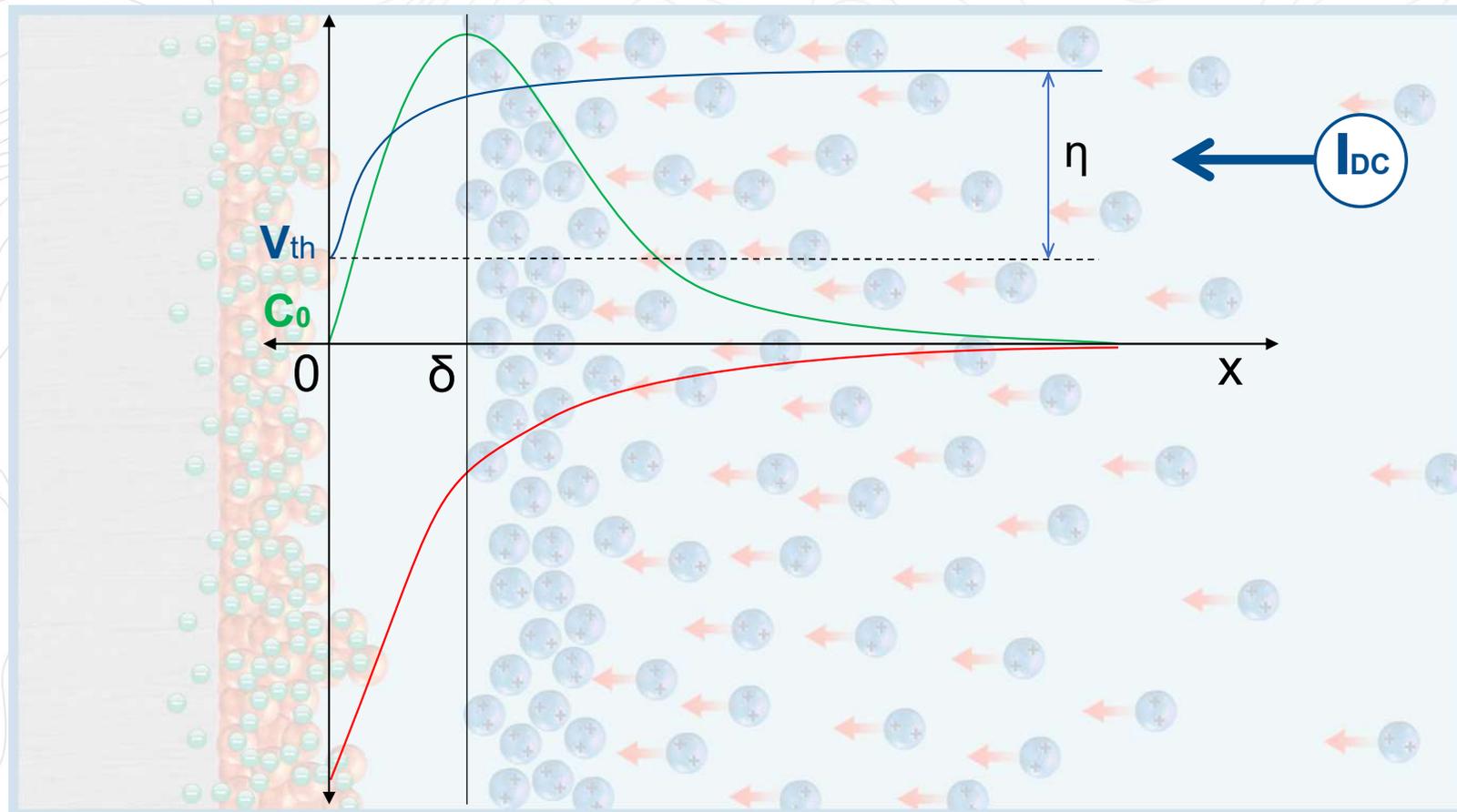


# MODELACIÓN DE LA INTERFAZ (PROCESO CONVENCIONAL DE ELECTRODEPOSITACIÓN: $I_{DC}$ )

– Densidad de Iones  $Cu^{++}$  Libres

– Potencial Eléctrico

– Campo Eléctrico

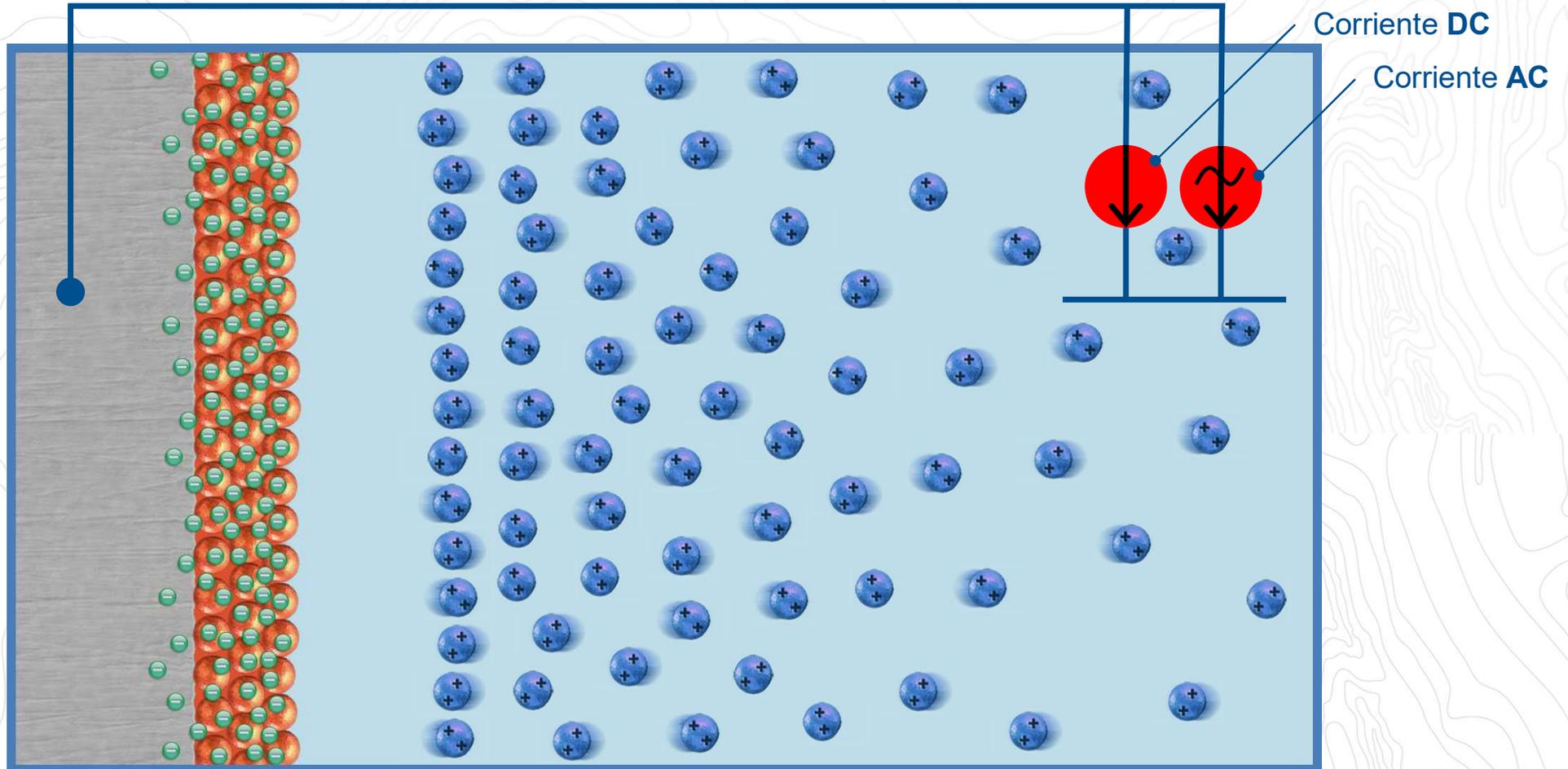


# MODELACIÓN DE LA INTERFAZ

## PROCESOS DE ELECTROLISIS CON SUPERPOSICIÓN DE CORRIENTE:

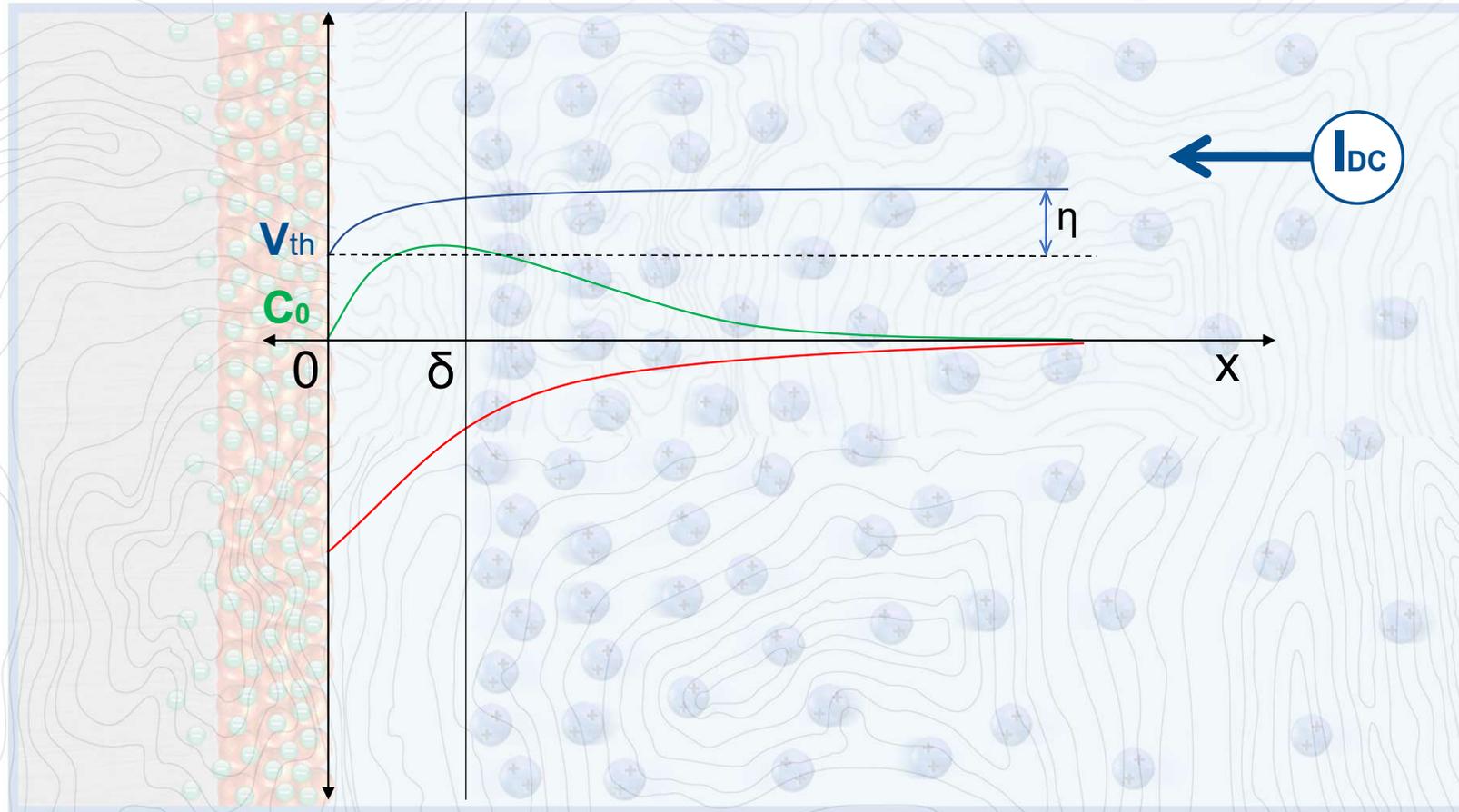
$I_{DC+AC}$

### MODELACIÓN DE LA INTERFAZ

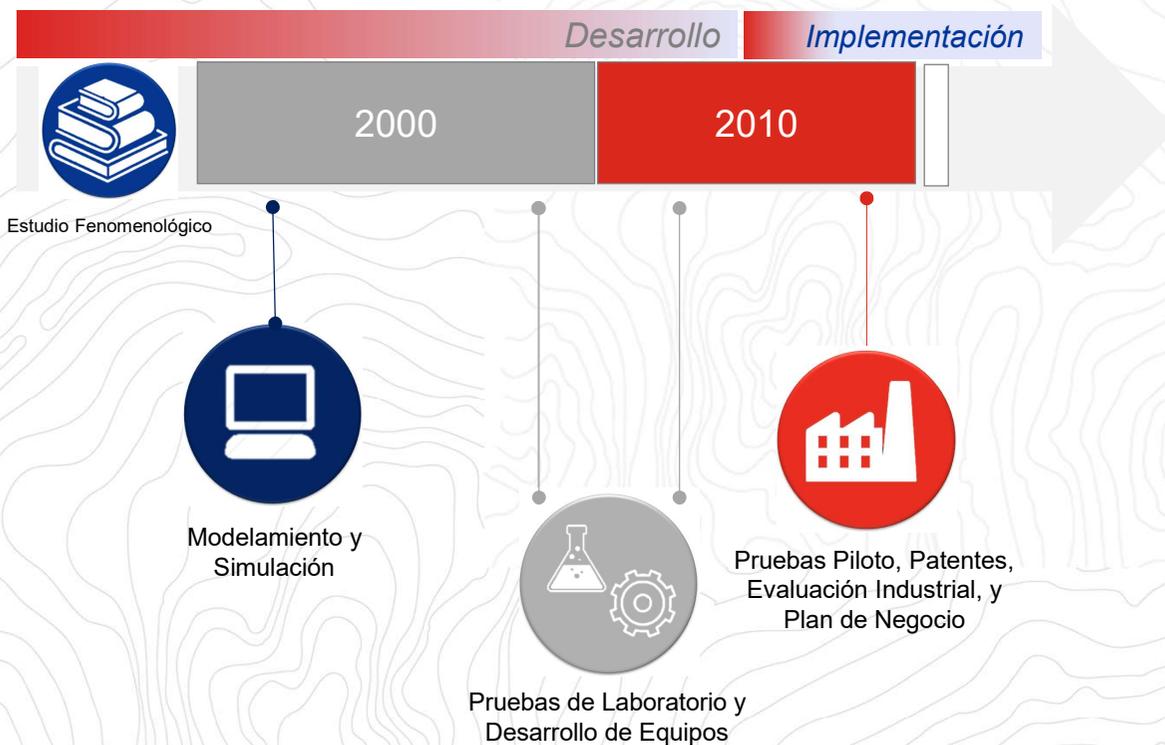


# MODELACIÓN DE LA INTERFAZ (PROCESOS DE ELECTROLISIS CON SUPERPOSICIÓN DE CORRIENTE: $I_{DC+AC}$ )

– Densidad de Iones  $Cu^{++}$  Libres      – Potencial Eléctrico      – Campo Eléctrico



# HITOS EN EL DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA DC+AC



- Resultados de Laboratorio
- **Patentes Industriales**
- Configuración de los Circuitos Eléctricos en Bancos de Celdas
- **Resultados en Planta Piloto**
- Riesgos asociados al uso de señales DC+AC
- **Evaluación Económica**
- Conclusiones

# **Resultados de Laboratorio**

## **Pruebas orientadas al cátodo**

# Resultados de Pruebas de Laboratorio orientadas al cátodo

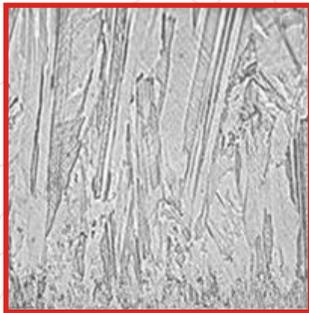


**I<sub>DC+AC</sub>**

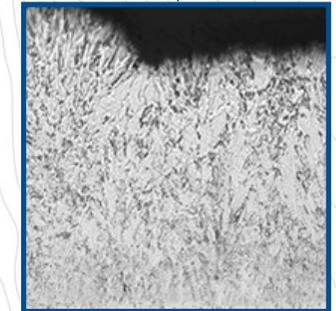
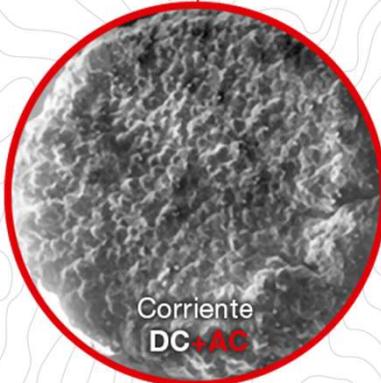
**I<sub>DC</sub>**

Calidad Superficial

Metalografía



PRUEBA N°	TIPO	CORRIENTE DC A/m <sup>2</sup>	FRECUENCIA Hz	AMPLITUD DE SEÑAL A/m <sup>2</sup>	TIEMPO Hrs.
<b>1</b>	DC	300	<b>0</b>	0	5
2	DC+AC	300	1000	250	5
3	DC+AC	300	5000	250	5
<b>4</b>	DC+AC	300	<b>10000</b>	250	5
<b>5</b>	DC	400	<b>0</b>	0	5
6	DC+AC	400	1000	250	5
7	DC+AC	400	5000	250	5
<b>8</b>	DC+AC	400	<b>10000</b>	250	5



Calidad Superficial

Metalografía

Frecuencia seleccionada para la señal alterna  
**5000 < f (Hz) < 10000**

- ¿De que manera enfrentamos el desarrollo de la Innovación en función del tiempo ?

..... paso de los mA a los kA .....

- Integración con profesionales de electrónica de potencia para desarrollar equipos eléctricos ad-hoc a la necesidad de evaluar la tecnología a escala piloto e industrial
- Se patenta la innovación en Chile y en el extranjero

#### P.I. 0817-2007

Proceso de generación de corriente alterna sin fuente externa para naves electrolíticas en procesos de electro-obtención y electro-refinación de cobre y otros productos.



+

#### P.I. 3315-2013

Proceso de superposición de corriente alterna sobre corriente continua para EW y ER de cobre y otros productos.



- Se crea el año 2014 la empresa Hecker DC+AC como un medio para formalizar la aplicación de la innovación tecnológica

# CONFIGURACIÓN ELÉCTRICA EN PROCESOS DE ELECTRÓLISIS DE COBRE

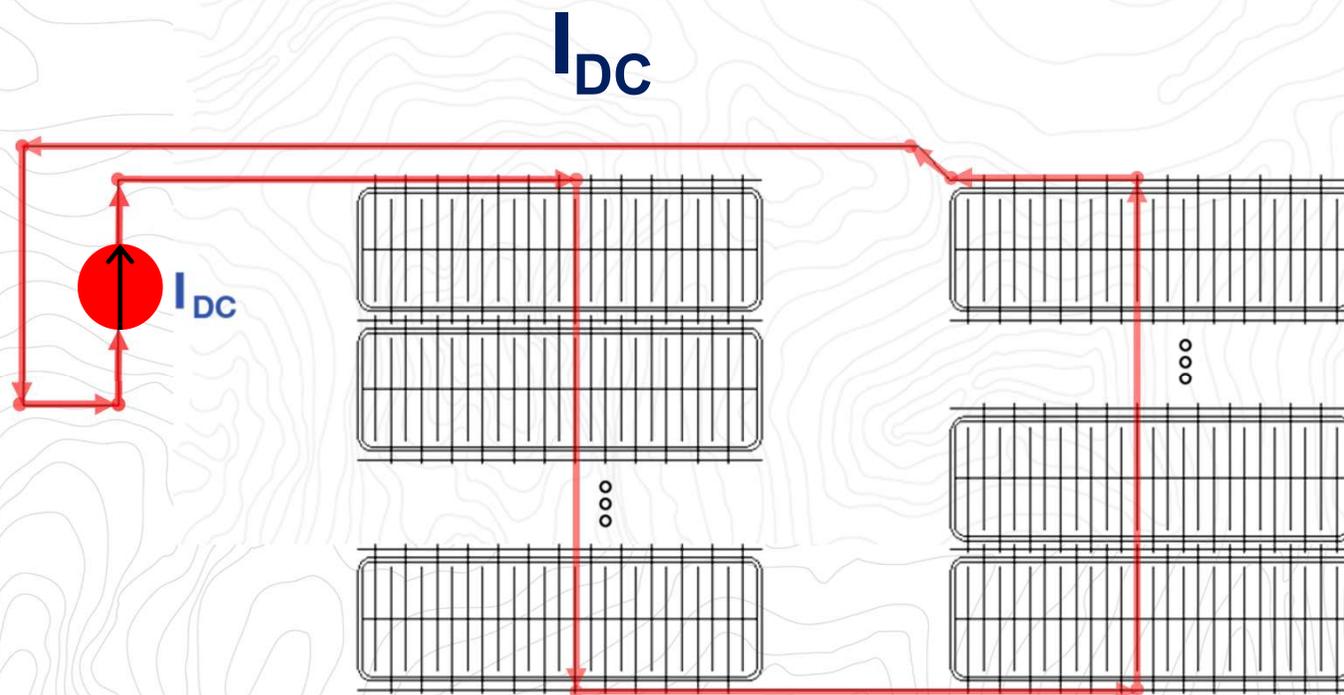
- **PROCESO CONVENCIONAL:**

$I_{DC}$

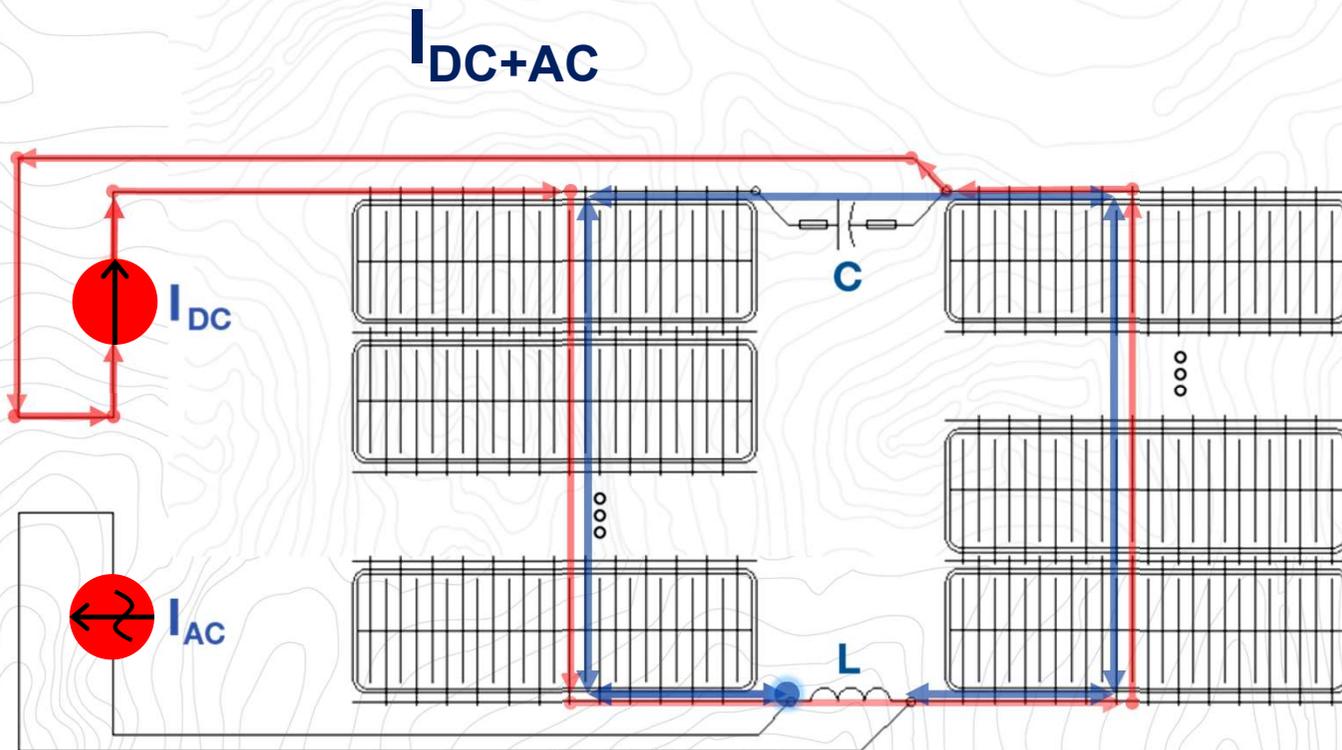
- **CON SUPERPOSICIÓN DE CORRIENTE:**

$I_{DC+AC}$

# CONFIGURACIÓN ELÉCTRICA EN PROCESOS CONVENCIONALES



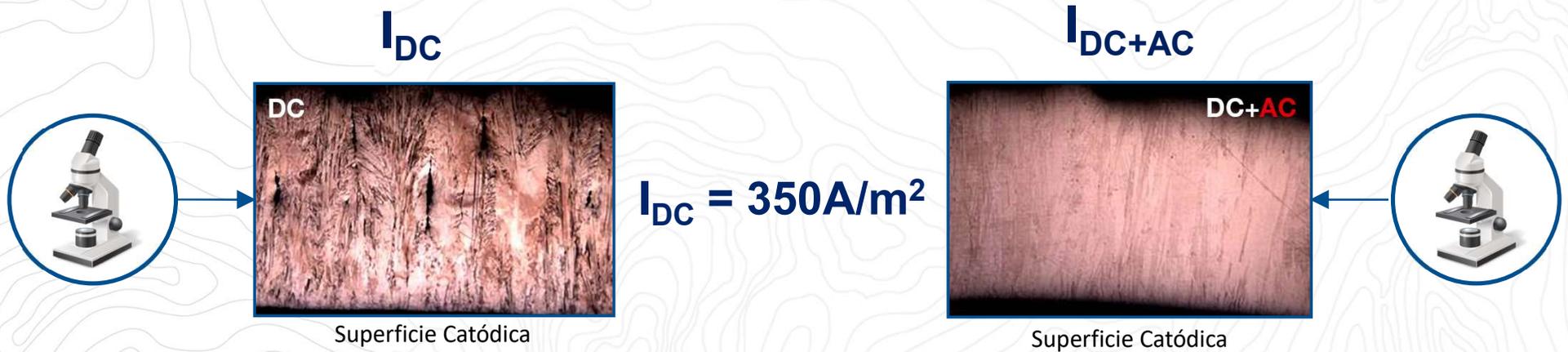
# CONFIGURACIÓN ELÉCTRICA CON SUPERPOSICIÓN DE CORRIENTE



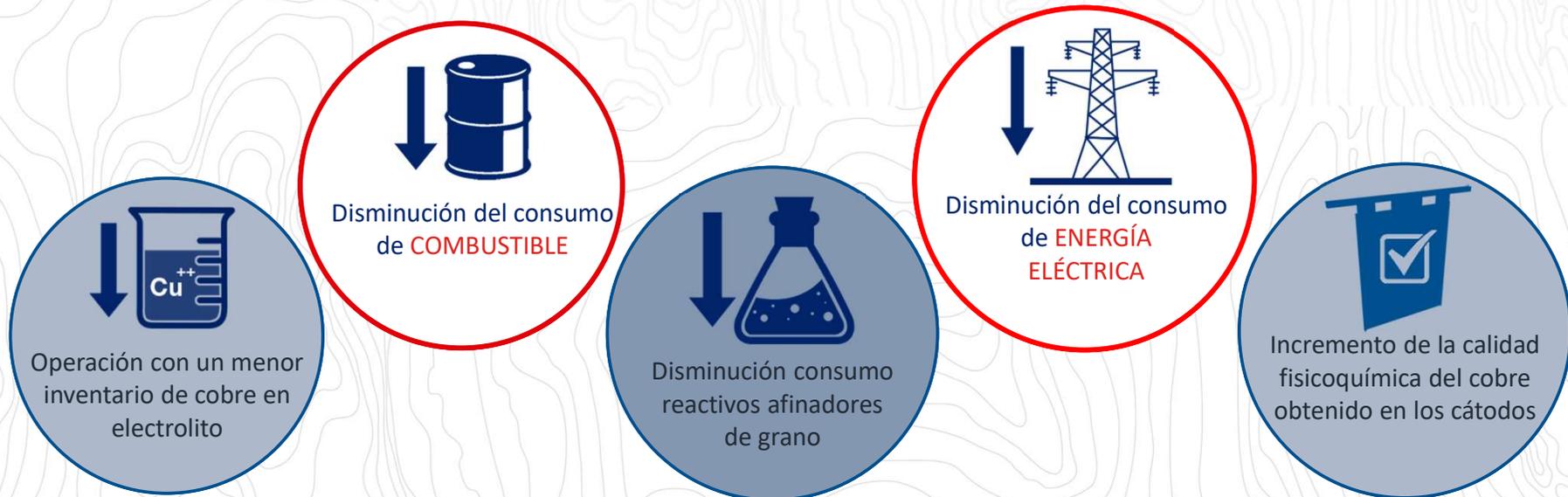
# Resultados obtenidos en Planta Piloto

(Pruebas de EW de Cu)

# Resultados de Pruebas Piloto orientadas al comportamiento del Cátodo



## Logros obtenidos en la Prueba Piloto



# Resultados de Pruebas Piloto Orientadas al Ánodo de Pb-Ca-Sn



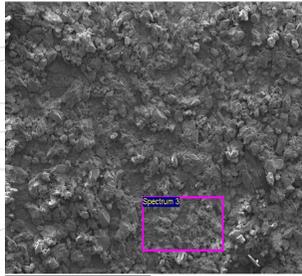
$I_{DC+AC}$

Ánodo Industrial Pb-Ca-Sn

$I_{DC} = 350A/m^2$



Metalografía

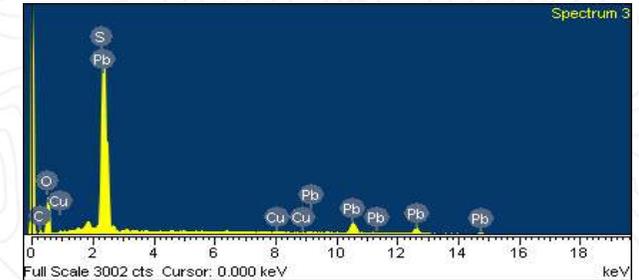


Estructura amorfa



Corte mecánico  
para análisis  
metalúrgico

Análisis SEM



$PbSO_4$

## Logros obtenidos en las Pruebas Piloto Orientadas al Ánodo

Aumento de la vida útil de los ánodos base plomo

Oportunidad para disminuir la frecuencia de desborde de las celdas

Oportunidad para disminuir el consumo de sulfato de cobalto

Profesora Marta López J.  
DIMAT – U de Concepción (2018)

## Riesgos asociados al uso de señales de corriente superpuestas en plantas de electrolisis y los controles

RIESGO	CONTROLES
<p>Mejor morfología de grano implica mayor adherencia del depósito de cobre en los cátodos.</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p>Evitar el pegado de placas en la MDC cuando se opera con cátodos permanentes.</p> <p>(Nota: La adherencia es función de la amplitud de la señal AC)</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. El set de pruebas comienza con el mínimo de amplitud (el observado en pruebas pilotos).</li> <li>2. No se impone AC hasta 2hrs después de la siembra.</li> <li>3. El óptimo (función de adherencia según amplitud AC) permite tener un control operativo para los eventos de: pegado y/o despegue prematuro.</li> <li>4. Control de la adición de reactivos afinadores de grano.</li> </ol>
<p>Fenómenos de Inducción (por aumento de circulación de corriente). Aumento de la T°C en los zapatos de seguridad con punta protectora de acero que utilizan los operadores de naves.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Las evaluaciones piloto mostraron un incremento no superior a 3°C.</li> <li>2. Es posible reemplazar los zapatos de seguridad con punta no metálica que normalmente utilizan los mantenedores eléctricos.</li> </ol>
<p>Riesgo operacional por la magnitud de la frecuencia de la señal AC superpuesta ~ 10KHz.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. No pueden estar en la nave o en el perímetro de ésta, personas con marcapasos.</li> </ol>

## Criterios de evaluación de la tecnología de superposición de corriente – Plantas de EW de Cu

A cuantificar y considerar en evaluación industrial	Consumo específico de energía eléctrica	Menos 140KWh/T
	Disminución de la T° del electrolito	Menos 8°C
	Reducción del consumo de aditivos orgánicos	Disminución en un 100%
	Disminución de tensoactivos	Menos 2ppm
	Incremento de la vida útil de los ánodos	Incremento en 2 años
	Disminución del consumo de sulfato de cobalto	Disminución en un 50%
	Incremento de la calidad catódica	Aumento en 3%
Ideal cuantificar, pero no será considerado en evaluación industrial	Disminución del inventario de cobre (EP)	Menos 5g/L de cobre en EP
	Nivel de adherencia del depósito a la placa madre	(a definir / parámetro nuevo)
	Aumento de densidad de corriente	Hasta 450A/m <sup>2</sup>

UNIDAD	ITEM	PRECIO
cUS\$/KWh	Energía Eléctrica	12,0
US\$/m3	Combustible	350
US\$/Kg	Guar	22,5
US\$/Kg	DXG	7,5
US\$/c.u.	Ánodos base Pb	450
US\$/Kg	Sulfato de cobalto	15
US\$/Ton	Tensoactivo	3,0
US\$/Ton	Beneficio High Grade	100,0

BENEFICIOS TÉCNICOS	PARA EVAL
Dism. Potencial de celda (V)	120
Eficiencia de corriente	95%
Dism. T° electrolito (°C)	8,0
Dism. Reactivos Org. (%)	100%
Incre. Vida útil ánodos (años)	2,0
Dism. Reactivos Inorg (%)	50%
Dism. Tensoactivos	3,0
Calidad HG (%)	95%

Disminución del OPEX  
en EW de Cobre

ε

- (a) 45 US/T (Valor conservador)
- (b) 100 US/T (Valor optimista)

# CONCLUSIÓN

DESAFÍO QUE SE PLANTEA EN ESTE EVENTO ES EL DE  
EVALUAR LA ALTERNATIVA DE INCORPORAR ESTA  
TECNOLOGÍA EN NAVES DE ER DE COBRE CON SEÑALES DE  
CORRIENTE SUPERPUESTAS

I  
DC+AC

La tecnología podría permitir:

- Operar con mayor densidad de corriente continua evitando la pasivación de los ánodos
- Mantener alto estándar de Calidad Catódica
- Disminuir el CEE por disminución del potencial de celda
- Otros beneficios a evaluar



**IMetChile**

**Muchas Gracias**

*Patrocinado por:*

**CESCO**  
CENTRO DE ESTUDIOS  
DEL COBRE Y LA MINERÍA

*Auspiciado por:*

**TRANSCARGO**

**ASC**  
Ingeniería

**TRV**  
RUPERTO VASQUEZ ESTAY  
SERVICIOS INTEGRALES PARA LA MINERÍA

