

Electrometalurgia y Reciclaje de Materiales

Tema 5. Introducción al proceso electrometalúrgico



Carlos Thomas García

Departamento de Ciencia e Ingeniería del
Terreno y de los Materiales

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



Definiciones y clases de electrometalurgia

La **electrometalurgia** se vale del consumo de **energía eléctrica** en las operaciones metalúrgicas aportando la energía en forma de **calor** o, directamente, **electricidad**:

- **Electrotermia o metalurgia de caldeo**: transforman la electricidad en energía **calorífica**.
- **Electrodeposición o metalurgia electrolítica de descomposición**: invierten la energía eléctrica en los **potenciales químicos**.

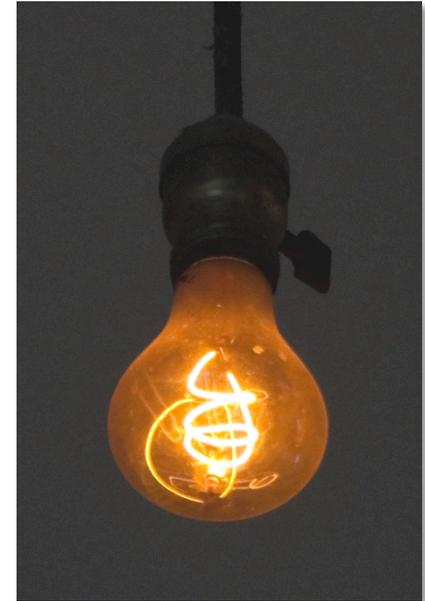
Metalurgia electrotérmica

La energía eléctrica se transforma en calor a través del **efecto Joule**. La carga, conductora, aumenta su temperatura al paso de la corriente.

Efecto Joule

Si en un medio circula corriente eléctrica, parte de la energía cinética de los **portadores de carga** se transforma en **calor** debido a los choques con los constituyentes del material por el que circulan, elevando la **temperatura** del mismo.

En un cable: el movimiento de los electrones en un cable es desordenado y provoca continuas colisiones con los núcleos atómicos y como consecuencia una pérdida de energía cinética y un aumento de la temperatura en el propio cable.



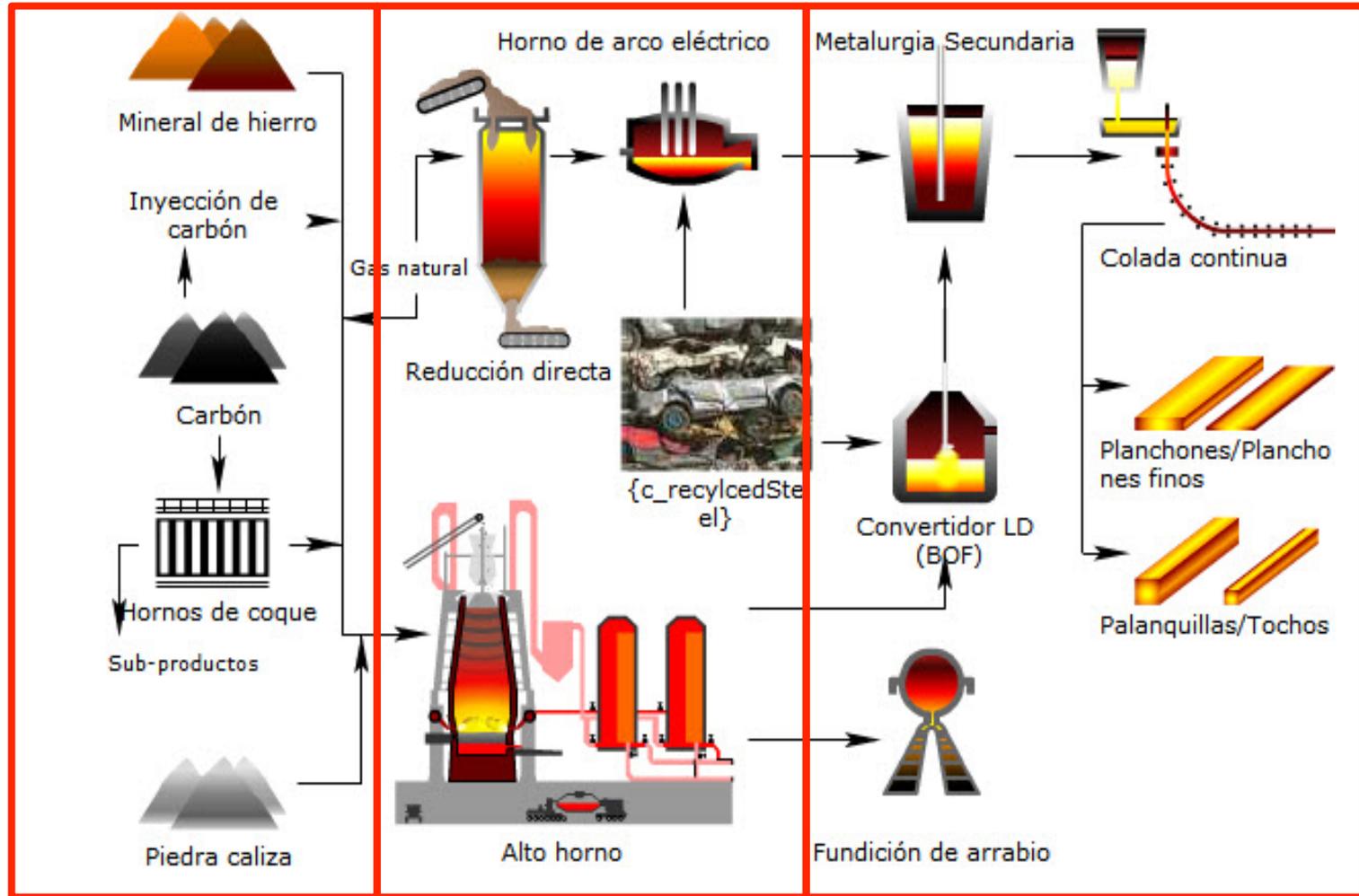
Hornos metalúrgicos electrotérmicos

Los **hornos electrotérmicos** pueden clasificarse en dos tipos según la naturaleza del **conductor**:

- **Horno eléctrico de arco:** el conductor es una columna gaseosa.
- **Horno eléctrico de resistencia:** el conductor es un cuerpo sólido o líquido.



Siderurgia



Minería

Metalurgia primaria

Metalurgia secundaria

La siderurgia - Generalidades



Horno eléctrico de arco (EAF)

La **energía eléctrica** se transforma en calor a través del efecto Joule que tiene lugar a través de la carga (metales sólidos puros, chatarra y metales líquidos), que es conductora, aumentando su temperatura al paso de la corriente hasta la completa **fusión**.

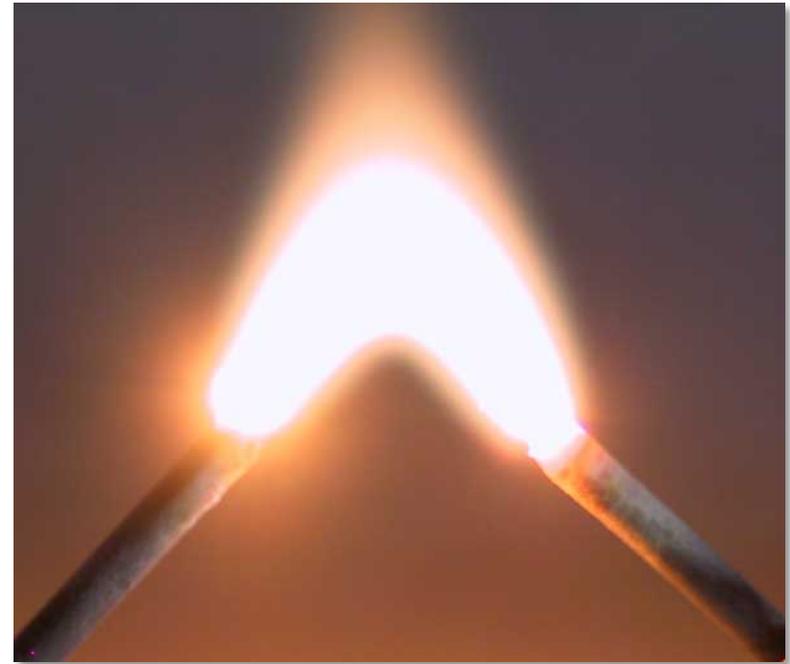
Los hornos eléctricos de arco pueden clasificarse en:

- De **arco sumergido o al aire**: dependiendo de si los electrodos quedan sumergidos o no en la carga.
- De **conducción o inducción**: según cómo sea transferida la corriente.

Arco eléctrico

En electricidad se denomina arco eléctrico o también arco voltaico a la descarga eléctrica que se forma **entre dos electrodos** sometidos a una **diferencia de potencial** y colocados en el seno de una **atmósfera gaseosa**.

La descarga está producida por **electrones** que van desde el electrodo negativo al positivo pero también en parte por **iones positivos** que se mueven en sentido opuesto. El choque de los iones genera un calor intenso en los electrodos.



Fuente: Achim Grochowski.

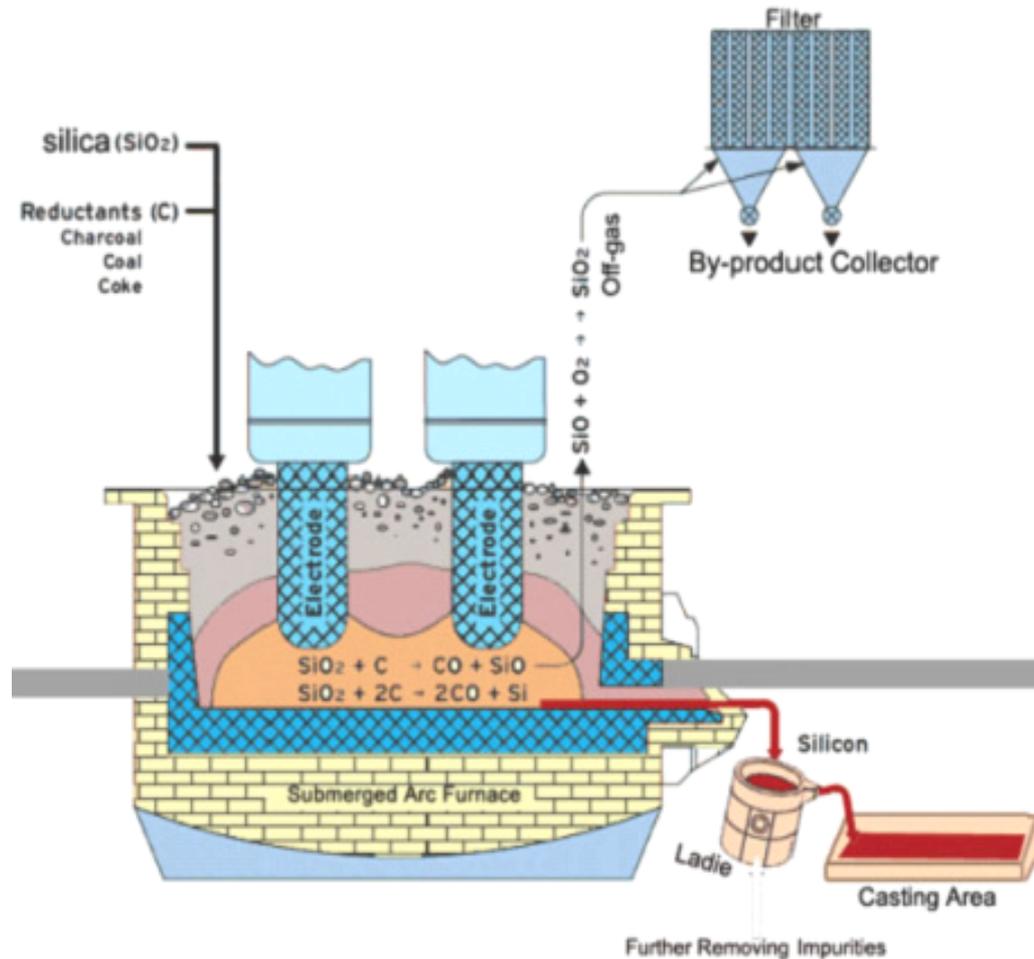
Horno eléctrico de arco sumergido

La energía eléctrica se transfiere a través de un **arco eléctrico** y también por **calentamiento** al contacto directo de la carga, también llamados de arco-resistencia. Se utiliza carbón y **minerales metálicos** refractarios para la fusión reductora. Fundición de Hierro.

Horno eléctrico de arco libre

La energía eléctrica se transfiere a través de un **arco eléctrico**. Dedicado a la fusión de metales de **alto punto de fusión** como es el caso del acero común e inoxidable.

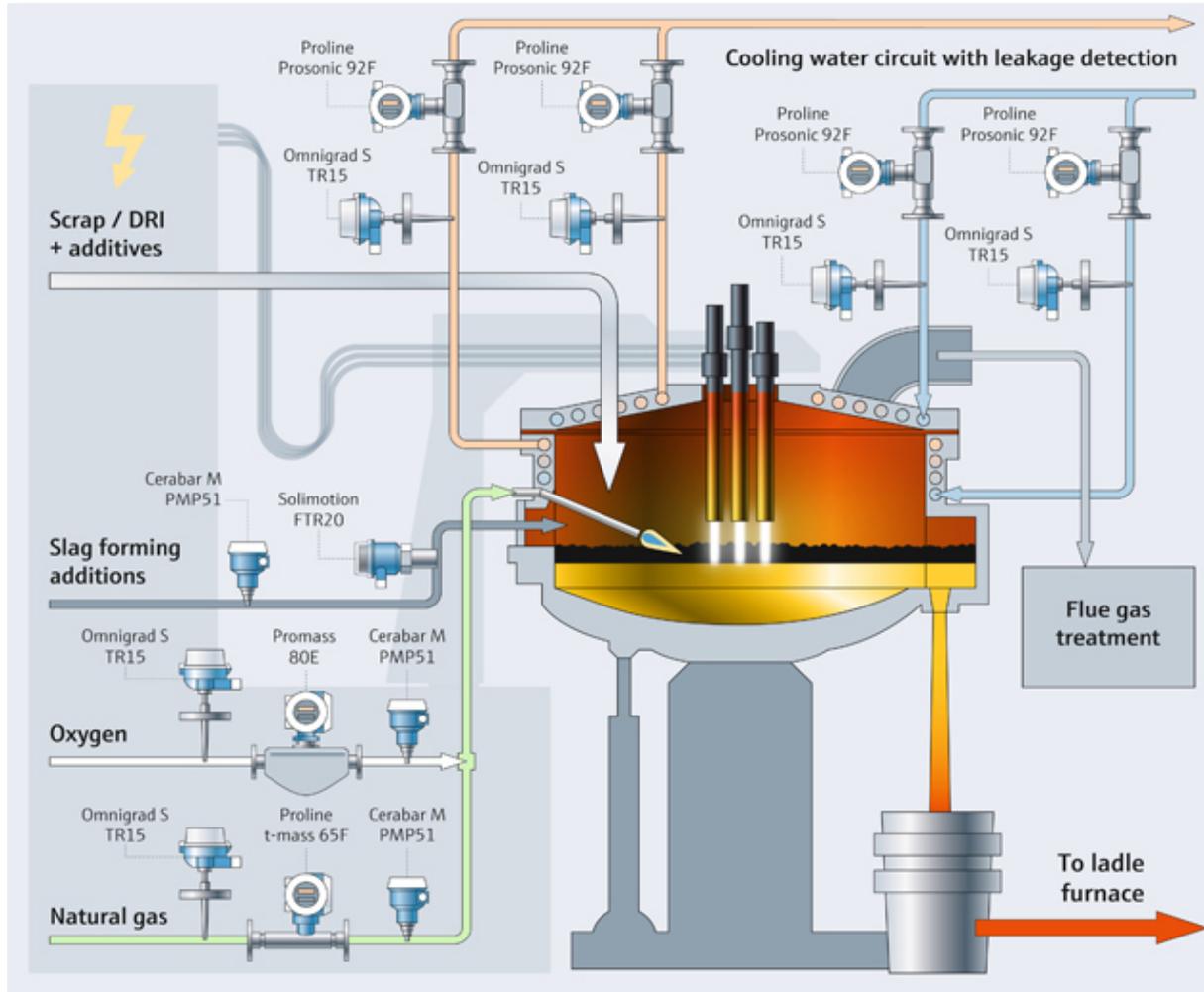
Horno eléctrico de arco sumergido



Horno eléctrico de arco sumergido



Horno eléctrico de arco libre



Horno eléctrico de resistencia por conducción

La energía eléctrica se transforma en **energía calorífica** que se transmite por conducción a la carga en contacto con la misma. Suelen ser hornos de marcha continua. El calor se distribuye **homogéneamente** por lo que son útiles en el mantenimiento del estado líquido.

Horno eléctrico de resistencia por inducción

La energía eléctrica se transfiere a través de un arco eléctrico. Se somete a la carga a un intenso campo magnético alterno que provoca una **corriente alterna de caldeo** (en la carga) que hace que aumente la temperatura.

Resistencia electrotérmica

Con **tensiones moderadas** (100-300 V) se consiguen **altas potencias térmicas** gracias a la corriente de caldeo que circula por la carga. Es el efecto Joule el responsable del incremento térmico:

- **Resistores**: son cargas que cumplen una función exclusivamente térmica.
- **Resistencias**: cargas con función termoquímica.

La corriente de caldeo depende de la conductividad eléctrica (solo electrones) y, en caso de **ionizaciones** también del **número y de la temperatura**. A mayor temperatura mayor movilidad de los iones

Resistencia electrotérmica

Si la corriente sólo depende de los **electrones**:

$$I (A) = \frac{U (V)}{R (\Omega)} \quad (\text{ley de Ohm})$$

La potencia **invertida**:

$$W (W) = \frac{U^2 (V^2)}{R (\Omega)}$$

La resistencia en función de la **resistividad**, función específica del material, para un hilo de longitud **L** y sección **S** es:

$$R (\Omega) = \rho \frac{L}{S}$$

Resistencia electrotérmica

Si la corriente depende también de los **conductores iónicos, gases** a elevada temperatura y líquidos como fundentes salinos y escorias, **no se verifica la ley de Ohm** porque el número de portadores depende de la **tensión** y de la **temperatura**.

En este caso, la relación es más complicada. En cualquier caso, la potencia de la carga es siempre **inversamente proporcional a la resistencia**.

Los **minerales y gases** a baja temperatura no son conductores pero a altas temperaturas son ideales como resistores iónicos y mixtos: **arco eléctrico**.

Hornos de arco sumergido

Utilización: metales y aleaciones metálicas por **fusión reductora** de óxidos metálicos de origen mineral. En ocasiones, se obtienen escorias o vapores de **valor económico**.



PRODUCTOS	
Silicio metal	Ferroboro
Ferrosilicio	Ferrofósforo
Ferromanganeso	Arrabio con escoria
Silicomanganeso	Silicocalcio
Ferrocromo	Ferroniquel
Carburo cálcico	Mata de cobre...

Hornos de arco sumergido

La energía se invierte en llevar a las **materias primas al punto de fusión** y suministrar la entalpía libre de **reducción** de los correspondientes óxidos.

Carga: **mineral, fundente y carbón reductor.**

El **carbón** puede ser coque siderúrgico o de petróleo, hullas, antracita, carbón vegetal, astilla de madera.. según el tipo de proceso. Se incorpora antes y de manera continua.

Los **electrodos** trabajan totalmente **enterrados en la carga**, son anchos y cortos.

Se genera una corriente entre el electrodo y la solera conductora.

Horno de arco eléctrico libre

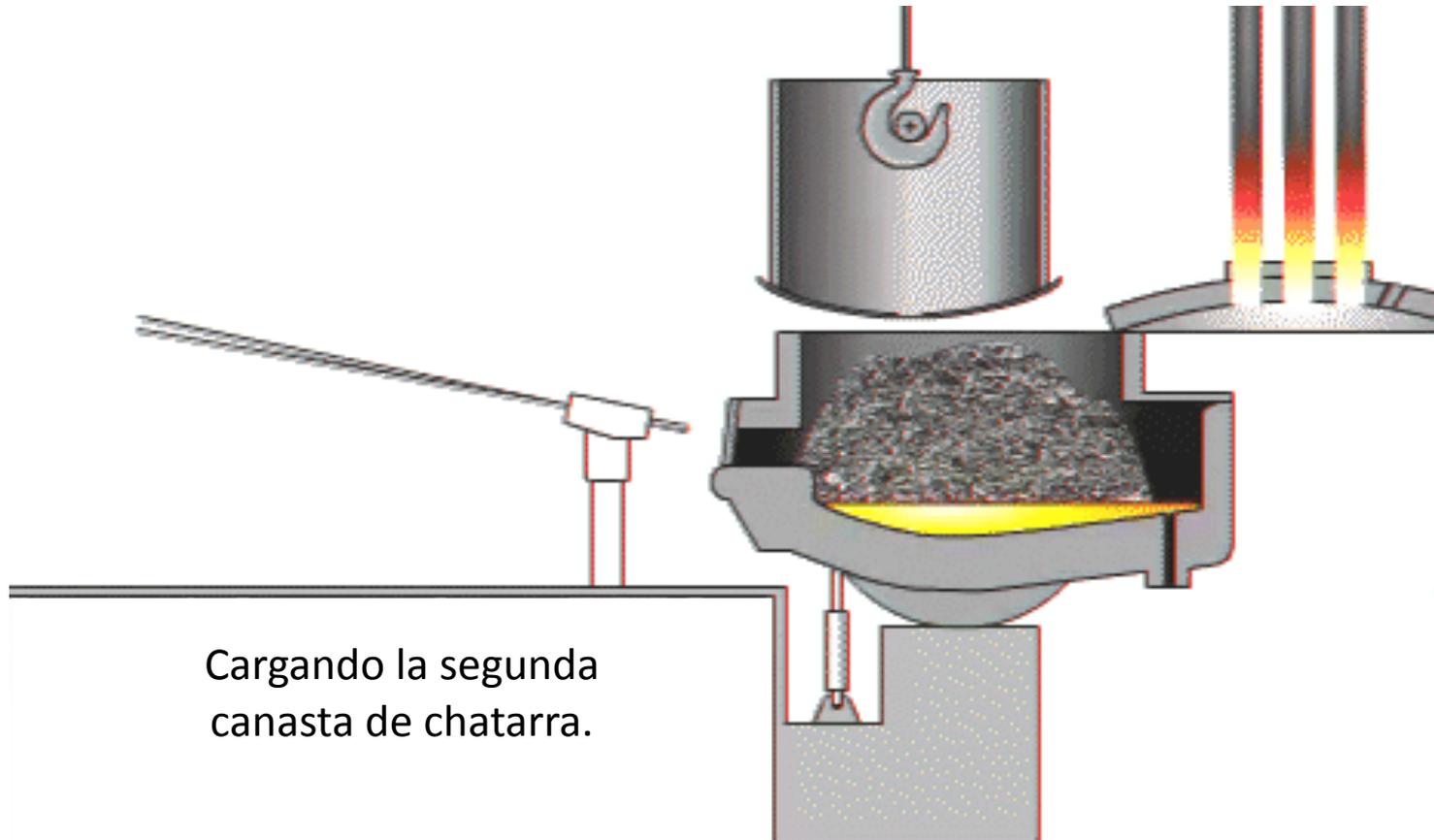
Este tipo de hornos trabajan en dos etapas:

- **Primera fusión:** varias cargas de chatarra de baja densidad.
- **Elaboración:** en la que el electrodo trabaja en resistencia sobre el caldo.

Al igual que los sumergidos utilizan **corrientes trifásicas**, por lo que van dotados de 3 electrodos que forman un **triángulo equilátero**. Más modernos son los hornos con un solo electrodo.

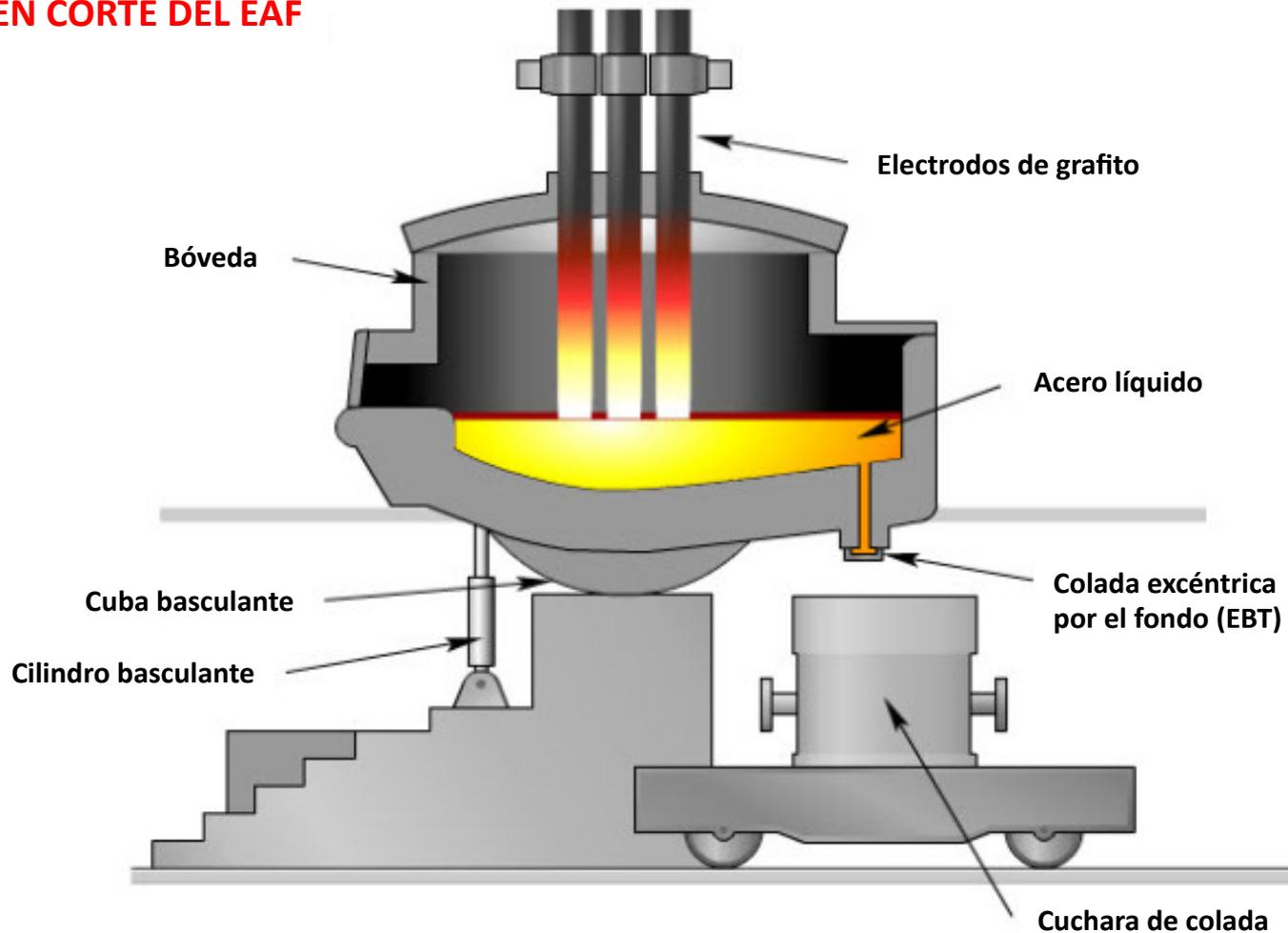
Cuanta mayor sea la intensidad, mayor será la potencia térmica generada ya que **el arco es más largo**.

Hornos de arco libre



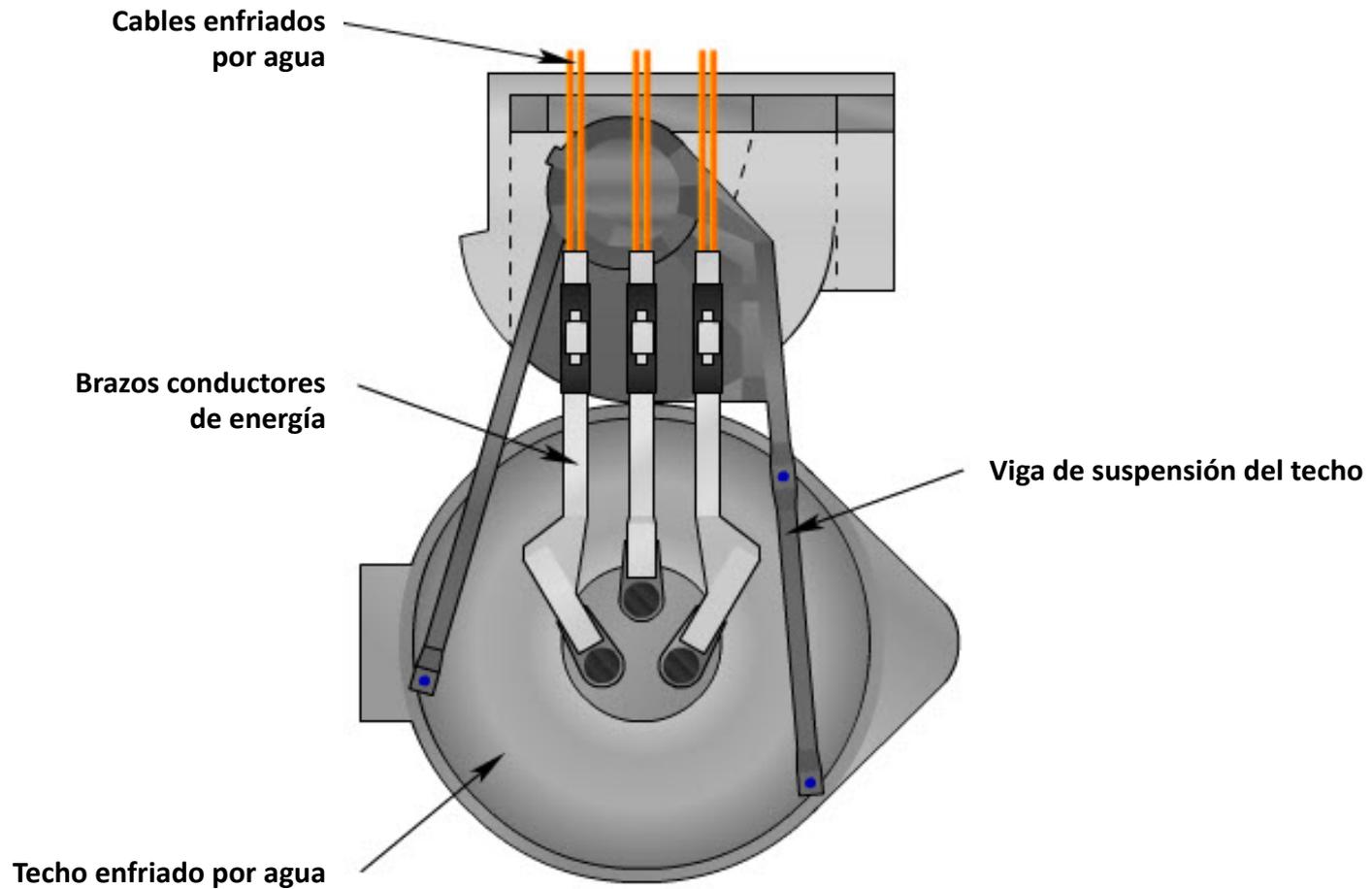
Hornos de arco libre

VISTA EN CORTE DEL EAF



Hornos de arco libre

VISTA EN PLANTA DEL EAF

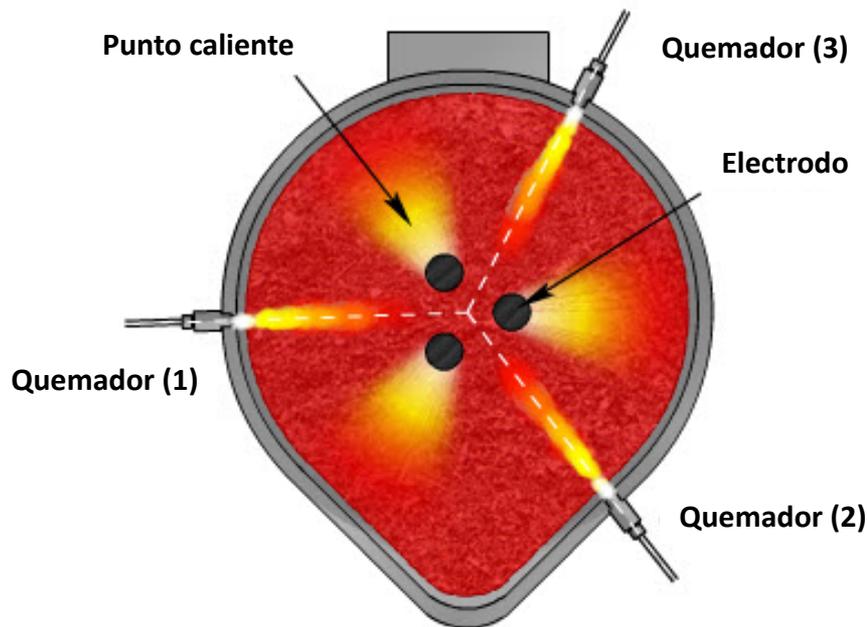


Hornos de arco libre

La distancia irregular entre los electrodos en las diferentes posiciones produce una **carga térmica asimétrica**. Además las fuerzas **electromagnéticas** hacen que los mismos se **desvíen** hacia afuera. Esto provoca que existan puntos calientes y fríos. en la chatarra.

Los **quemadores** en las áreas de baja carga térmica reducen los gradientes.

Un quemador típico del EAF utiliza **combustible gaseoso o aceite** y sólo será efectivo siempre que las llamas impacten en la chatarra.



Hornos de arco libre

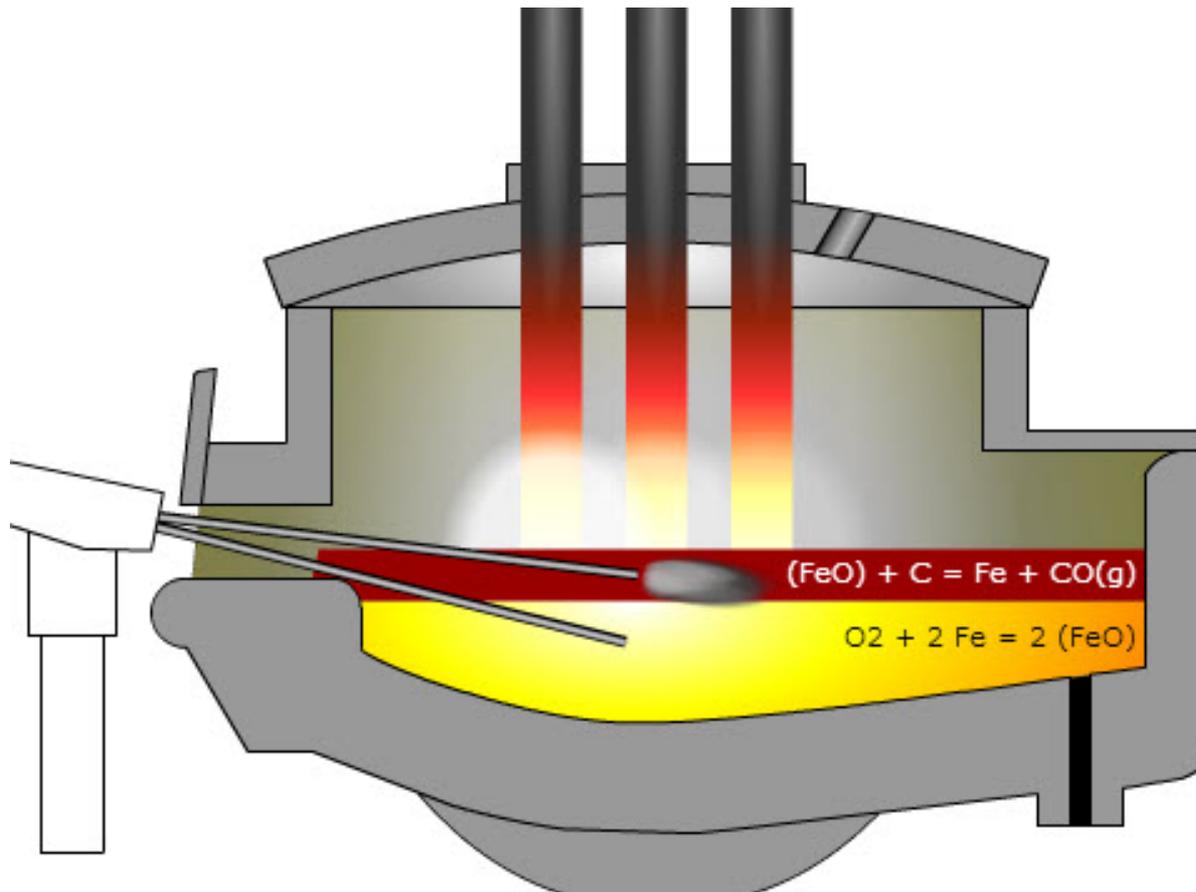
La **escoria espumante** se utiliza a fin de aumentar la **eficiencia térmica** del horno durante el período de afinado, cuando las paredes laterales están totalmente expuestas a la radiación del arco.

Una escoria espumante **crecerá y cubrirá los arcos eléctricos**. Además un arco eléctrico cubierto por una escoria espumante tendrá una **eficiencia mayor** en la transferencia de energía.

El espumado de la escoria es logrado por **inyección de oxígeno en el acero líquido** donde se oxida fundamentalmente el hierro. Después es inyectado polvo de carbono en la fase escoria donde el óxido de hierro es reducido.

Hornos de arco libre

ESPUMADO DE LA ESCORIA



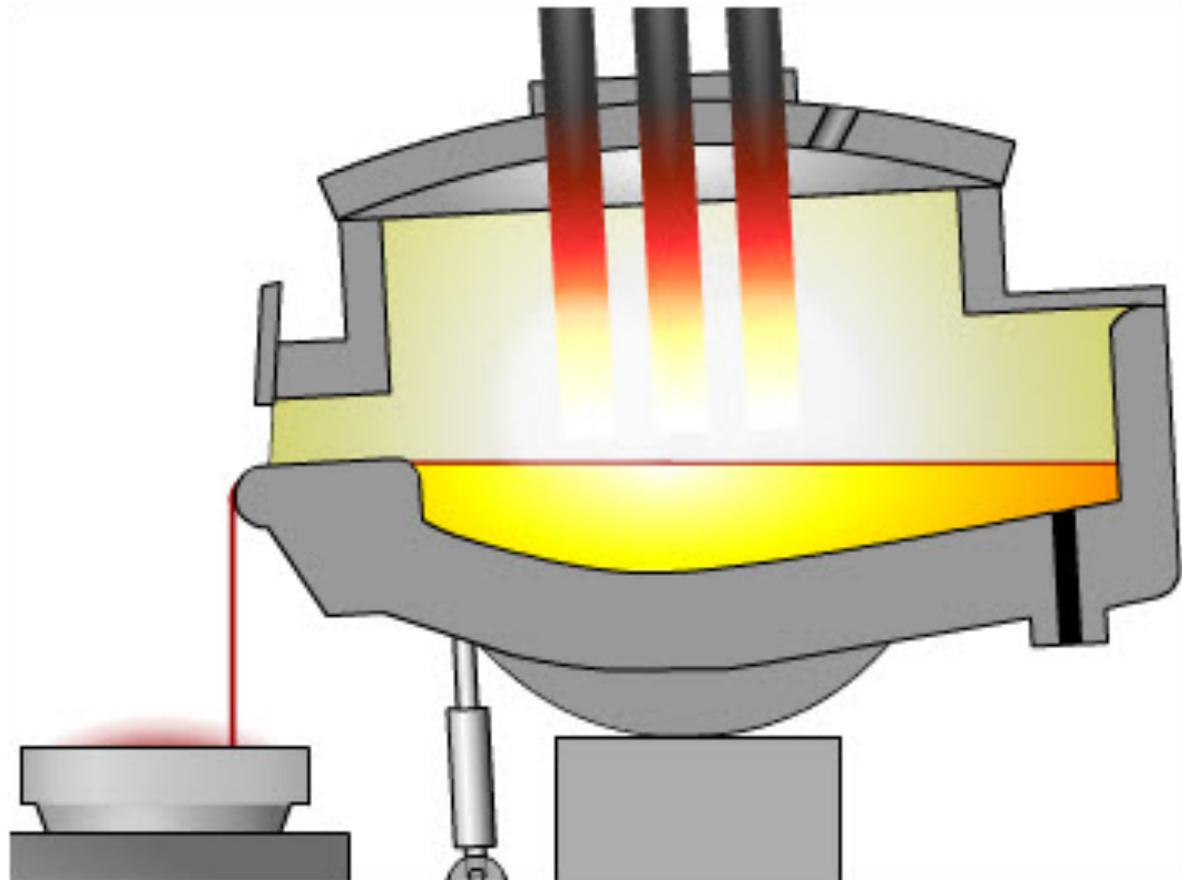
Hornos de arco libre

El **desescoriado** se realiza por la **puerta de escoria**, suele estar ubicada en una de las paredes de la parte posterior del horno. Esta abertura es utilizada por el operador para la **inspección** del interior del horno, la **inyección de oxígeno y carbono** utilizando lanzas consumibles y para el desescoriado.

Durante el espumado de la escoria, la misma es **continuamente eliminada** a través de la puerta de escoria. Un desescoriado mayor tiene lugar siempre que se necesite una nueva escoria para realizar la próxima operación metalúrgica.

Hornos de arco libre

DESESCORIADO



Hornos de arco libre

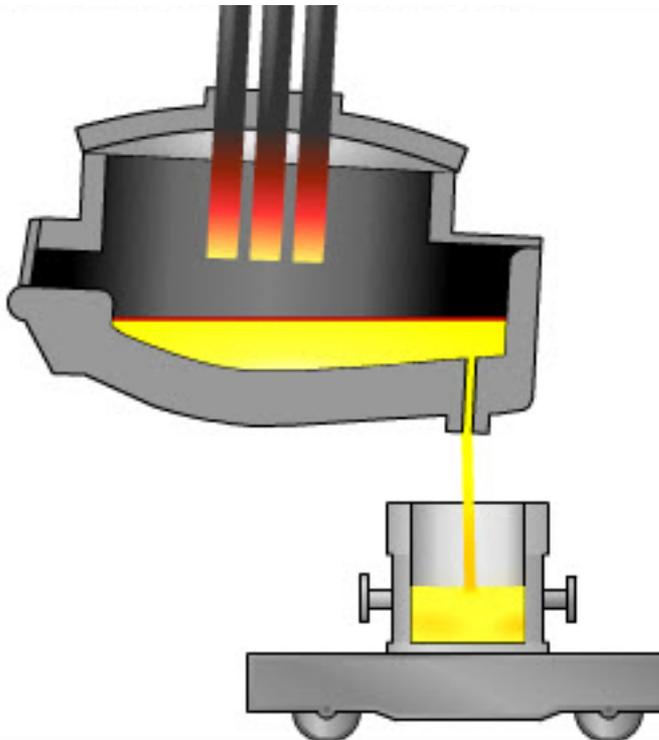
El colado del horno tiene lugar una vez alcanzada la temperatura deseada. El **colado** debería realizarse lo más rápido posible a fin de ahorrar tiempo.

Los hornos de colada excéntrica por el fondo (EBT) poseen un **aliviadero descentrado en la base** del horno que proporciona una colada libre de escoria.

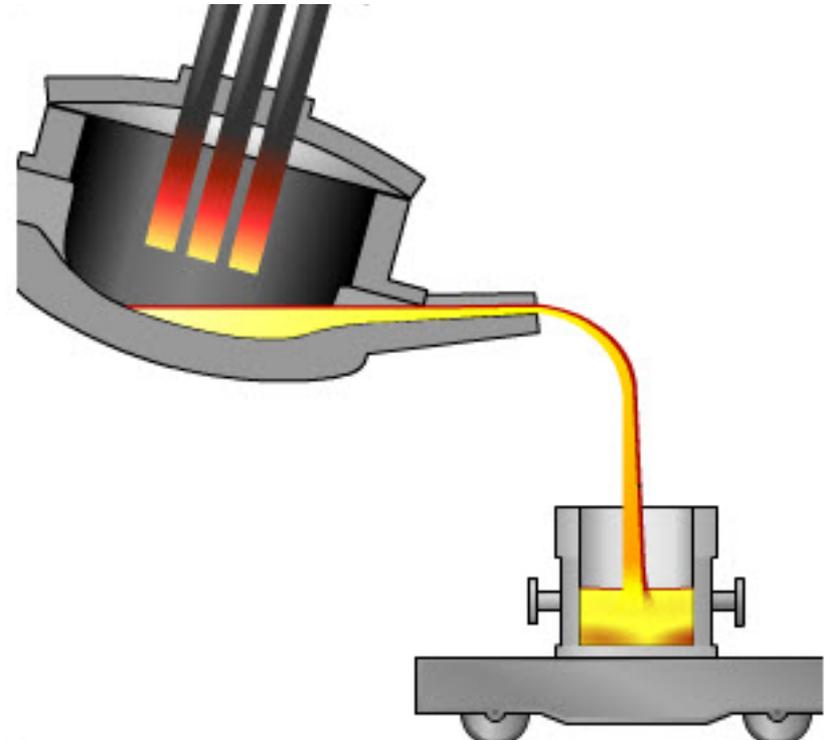
Los hornos de piquera son utilizados para algunos tipos de acero. El colado por piquera hace que la escoria sea **trasvasada a la cuchara**, donde se mezcla completamente con el acero.

Hornos de arco libre

COLADA EXCÉNTRICA POR EL FONDO (EBT)

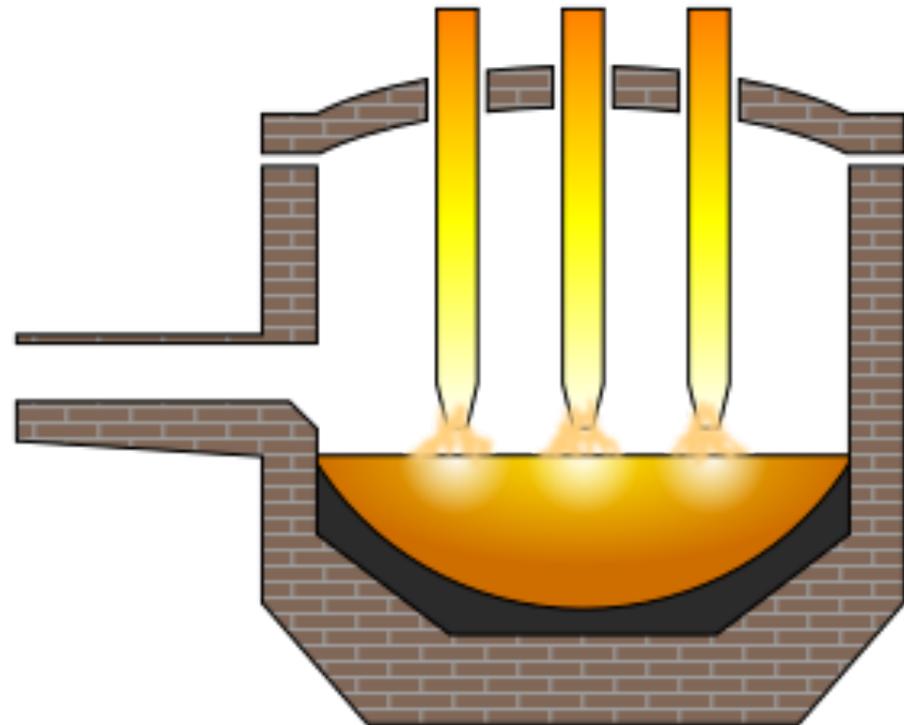


COLADA POR PIQUERA



Horno de arco eléctrico libre

Un esquema de la sección transversal de un horno de arco eléctrico. Tres **electrodos**, material fundido, desembocadura a la izquierda, **bóveda** extraíble de ladrillo refractario, paredes de ladrillo y un **hogar con forma de tazón** y de material refractario.



Horno de arco eléctrico libre

Los electrodos de este tipo de hornos son de **grafito** debido a su alta conductividad, alcanzando **mayores densidades de corriente** entre electrodos que con el carbono amorfo o pasta Soderberg (típicos en los sumergidos).

Además de su ligereza, el grafito posee **menor resistividad** a 500°C que a temperatura ambiente aunque a partir de este valor comienza a subir.

El electrodo de grafito suele tener una longitud de unos **1,5 m**. Se debe sustituir periódicamente por desgaste debido a la oxidación y roturas.

Horno de arco eléctrico libre

ELECTRODOS DE GRAFITO



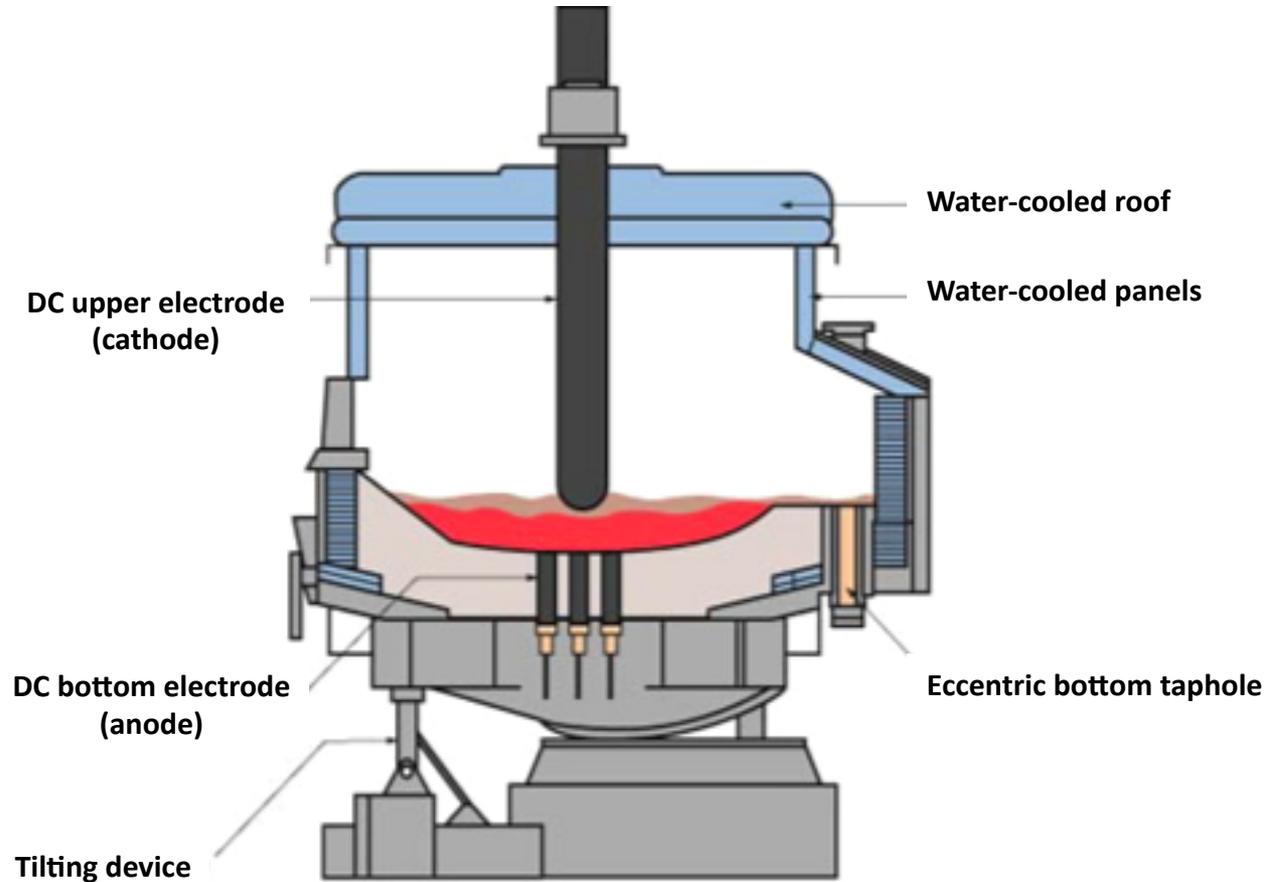
Horno de arco eléctrico libre de corriente continua

Este tipo de hornos poseen solamente un **electrodo de grafito** y realizan el cierre de la corriente **por solera** en el fondo de la cuba.

Al no existir **impedancias** debido a la **corriente continua**, el aprovechamiento de la **intensidad** por unidad de superficie del electrodo es mayor que en el caso de 3 electrodos en alterna.

El **electrodo es el cátodo** para así evitar las pérdidas electrolíticas de carbono debido a la corriente continua.

Horno de arco eléctrico libre de corriente continua



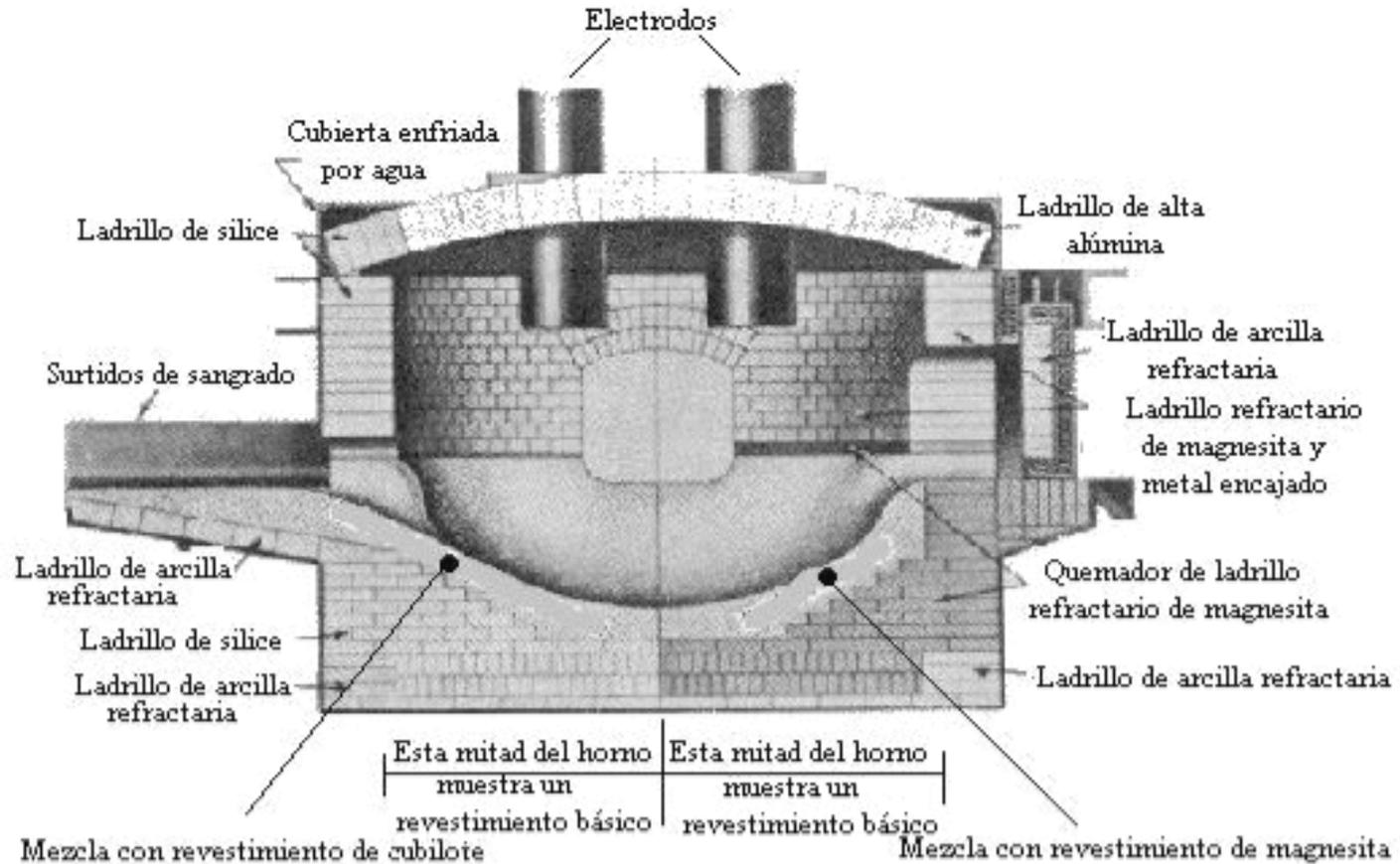
Horno de arco eléctrico libre

La **cuba es cerrada** y suele bascular en dos sentidos. En un sentido para la **descarga del metal** y en el otro sentido para la descarga de la escoria.

La bóveda suele estar refrigerada y:

- Permite **reverberar la radiación** por el revestimiento refractario.
- **Confina los humos** permitiendo la extracción.
- Evita el riesgo de salpicaduras.
- Materiales de baja dilatación térmica y alta refractariedad: alúmina.

Horno de arco eléctrico libre



Dibujo de corte de un horno eléctrico con revestimientos tipo ácido y básico.

Horno de inducción

Es una tecnología **extremadamente rápida**, limpia y uniforme, que permite omitir la **fase de purificación necesaria** con otros métodos.

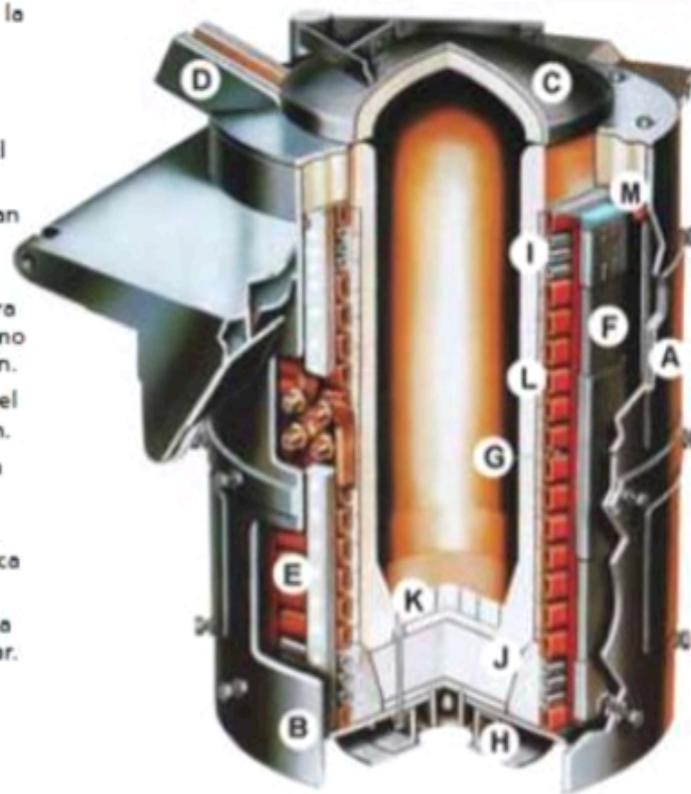
El **calor uniforme** inducido en el metal también contribuye a un resultado final de alta calidad.

Operación amigable con el **medio ambiente**, quizás una de sus mayores fortalezas.

Costos de operación más bajos en diferentes aspectos como la materia prima (refractario, electrodos, consumibles, etc.) y mano de obra.

Horno de inducción

- A. Paneles: Están contruidos de acero resistente para proteger la bobina durante la operación de horneó.
- B. Casco de protección: Sirve como una barrera impenetrable entre el metal salpicado y la bobina.
- C. Tapas aisladas que minimizan la pérdida de calor.
- D. Anillo recolector de humo: Especialmente diseñado para eliminar humo nocivo y humo durante el ciclo de fundición.
- E. Espiras macizas: Optimizan el rendimiento en la fundición.
- F. Yugos magnéticos: Reducen el calor excesivo.
- G. Espacios entre las espiras: Optimizan eficiencia eléctrica y reducen humedad.
- H. Parte inferior abierta: Ayuda a reducir humedad y ventilar.
- I. Bobinas de enfriamiento: Amplian la vida del recubrimiento
- J. Formas refractarias.
- K. Detección de fugas con polo a tierra para mayor seguridad.
- L. Tubería adecuada para su aplicación.
- M. Aislamiento de alta temperatura. Barrera de aislamiento eléctrico y térmico.



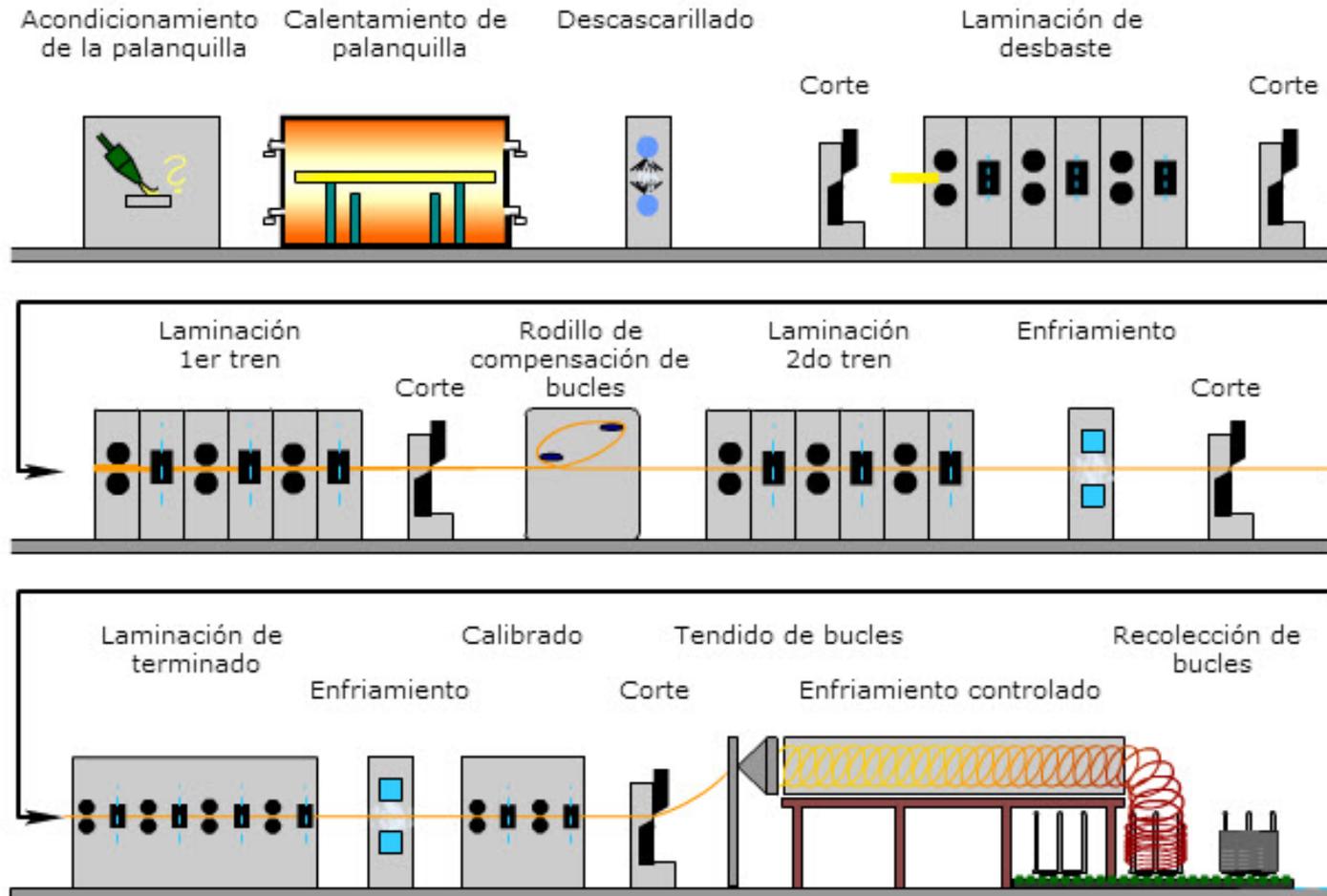
Laminación del alambón

El **alambón**, normalmente de sección transversal circular, es producido en laminadores de una línea o de múltiples líneas. Los laminadores de alambón modernos pueden producir alambón en **diámetros de 4–25 mm**.

La laminación del alambón se lleva a cabo en un **laminador continuo** que consiste de cuatro trenes: un tren desbastador, dos trenes intermedios y un tren terminador, con cizallas instaladas entre medio.

El alambón puede ser utilizado como **materia prima** para la producción de una variedad de productos tales como alambre, cables de alambre, resortes, tornillos, tuercas, clavos, pernos...

Laminación del alambρόn



El ciclo del acero



Fuente: <http://apta.com.es/otua/otuaesp.html>.