

TÉCNICAS EXPERIMENTALES EN METALURGIA

Unidad temática n° 8: Hornos y Medición de temperatura

8.1.: Hornos de tratamiento térmico

Existen muchos tipos de hornos para tratamientos térmicos, que varían en diseño, tamaño, fuente térmica, temperaturas de operación, modo de calentamiento, medio de transferencia de calor, modo de operación (continua o tipo batch), etc., de modo que una clasificación exacta resulta virtualmente imposible.

En cuanto al tamaño varían desde pequeños modelos con capacidad de unos pocos gramos, hasta hornos de base móvil que permiten calentar cientos de toneladas de una sola vez. Independientemente de su tamaño, hay hornos que pueden calentarse con combustible en forma directa, en cuyo caso la pieza a tratar queda expuesta a los gases de combustión, o indirectamente, en cuyo caso la pieza queda aislada de los gases. Además, hay hornos que se calientan por resistencia eléctrica.

8.2.: Modos de Calentamiento

Los tres modos básicos de transmisión de calor son conducción, convección y radiación. Pueden utilizarse solos o en combinación.

La *Conducción* de calor en un sólido tal como una pieza metálica, es la transferencia de calor desde una parte del sólido a otra, bajo la influencia de un gradiente de temperatura y sin desplazamiento apreciable de las partículas. Por ejemplo, si la temperatura superficial de una pieza es elevada, el flujo calórico hacia el centro ocurre por un mecanismo molecular. La conducción involucra la transferencia de energía cinética desde una molécula a otra en una reacción en cadena. El flujo calórico continúa hasta alcanzarse el equilibrio. El tiempo involucrado depende de la conductividad del metal, siendo en general relativamente rápido.

En la mayoría de los tratamientos térmicos, la conducción juega un rol menor en el total de calor transferido desde la fuente a la pieza; sin embargo, es el único modo de transferencia desde la superficie de ésta al centro. Una excepción a este rol minoritario ocurre en el baño de sal con electrodo inmerso y en el lecho fluidizado. Mientras que los tres modos están presentes en estos casos, la conducción juega un papel importante debido a que el medio caliente está en contacto directo con la superficie del metal.

La *Convección* involucra la transferencia de calor por mezcla de una parte del fluido (líquido o gas) con otra. El movimiento del fluido puede deberse enteramente a la diferencia de densidad producto de la diferencia de temperatura, como en la convección natural, o puede producirse por medios mecánicos, como en la convección forzada. Usualmente se utilizan ventiladores para incrementar el coeficiente de transferencia térmica del sistema.

La **figura 8.1** muestra un horno que se calienta por recirculación de aire forzado. Los calefactores eléctricos se ubican aparte de la cámara de trabajo. El aire en el horno se fuerza a través de la cámara de calentamiento a alta velocidad y luego a la cámara de trabajo. Este sistema permite controlar la temperatura con excelente precisión. Este método de calentamiento es altamente eficiente hasta aproximadamente 500

°C. Aunque se le utiliza a mayores temperaturas, la eficiencia del calentamiento por convección decae bastante.

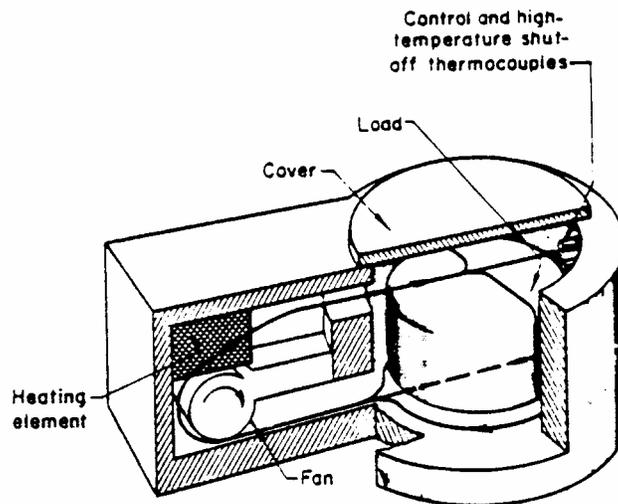


Figura 8.1.: Horno de baja temperatura calentado por convección

Radiación: Un cuerpo emite energía radiante en todas direcciones por medio de ondas electromagnéticas de longitud de onda en el rango de 4 a 7 mm. Cuando esta energía golpea a otro cuerpo, parte de ella es absorbida, elevando así el nivel de actividad molecular y produciendo calor, y parte es reflejada. La cantidad absorbida depende de la emisividad de la superficie receptora. El emisor cede calor o energía. De acuerdo a esto, si se colocan dos piezas de metal, una caliente y otra fría, en un recipiente totalmente aislado, la pieza caliente se enfría y la fría se calienta hasta alcanzar ambas la misma temperatura. Aun alcanzado el equilibrio térmico, el proceso de intercambio energético continúa con cada pieza irradiando y absorbiendo energía la una de la otra.

Por lo tanto, la transferencia calórica por radiación se relaciona directamente con la emisividad, que es la razón entre la rapidez de pérdida de calor por unidad de área de una superficie a una temperatura dada, y la rapidez de pérdida de calor por unidad de área de un cuerpo negro a la misma temperatura. En términos prácticos, cuando se coloca una pieza de trabajo en un horno y se la expone a calor por radiación, su velocidad de calentamiento depende de su superficie. Un objeto altamente reflectante (por ej. acero inoxidable pulido) absorbe calor a menor rapidez que un objeto oscuro.

La mayor parte de los hornos de tratamientos térmicos que operan a temperaturas superiores a 600°C son calentados principalmente por radiación, independientemente de su tamaño, o de si son calentados por elementos de resistencia eléctrica, directamente por medio de la radiación de quemadores y las paredes del horno, o indirectamente por quemadores contenidos en tubos (tubos radiantes). Un horno típico de tratamiento térmico calentado por radiación, es el horno batch del tipo caja simple mostrado en la **figura 8.2**. Se pueden ver los elementos de resistencia eléctrica en las paredes laterales. En muchos hornos de gran tamaño se emplea adicionalmente la convección forzada por medio de ventiladores para aumentar la eficiencia de calentamiento y la uniformidad de temperatura.

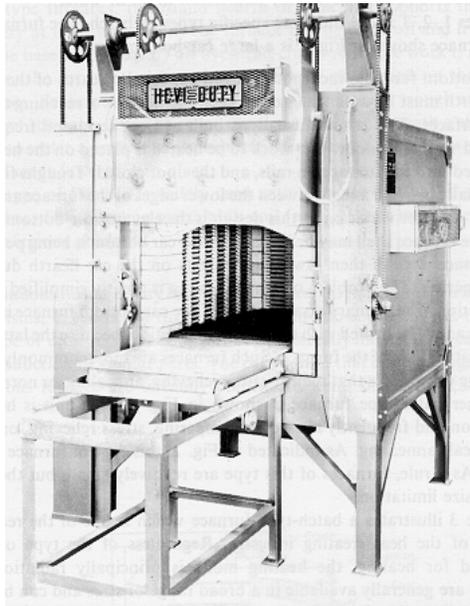


Figura 8.2.: Horno tipo batch pequeño.

8.3.: Hornos Tipo Batch Versus Tipo Continuo

Un Horno tipo Batch se refiere a uno que se carga y se cierra para que cumpla un ciclo de calentamiento preestablecido. Después de completado el ciclo de calentamiento, la carga puede enfriarse en el horno a una velocidad determinada, o extraerse para enfriarla al aire o en un medio de temple. El horno de la **figura 8.3** es un horno de base corrediza con capacidad para cientos de toneladas. Las piezas a tratar se posicionan en el carro sobre riel; éste se empuja hacia el hogar del horno y se cierra una puerta alzable para comenzar el ciclo. Una variación de este horno es el horno de base corrediza con elevador, en el cual el cuerpo del horno puede levantarse mientras se posiciona la base.

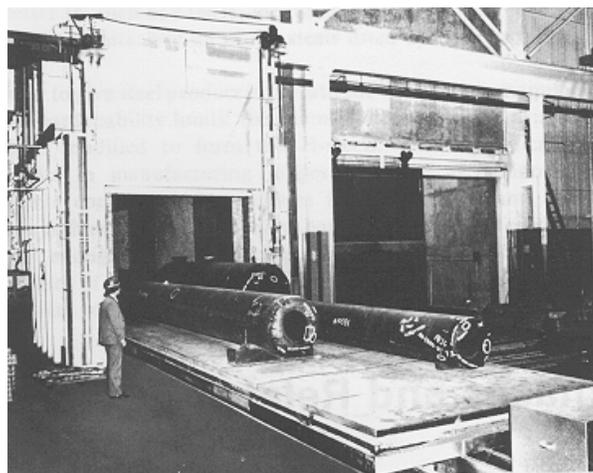


Figura 8.3.: Horno de base corrediza

El horno de la **figura 8.1** es del tipo carga superior. En general, son pequeños aunque no existe una limitación de tamaño específica.

Como se indicó en la sección anterior, los hornos del tipo de la **figura 8.2** se calientan por radiación, cualquiera sea el tipo de energía usada para calentarlos. Estos hornos están disponibles en un amplio rango de tamaños y pueden calentarse con gas, petróleo o electricidad. El de la figura utiliza elementos calefactores metálicos, lo que permite una operación eficiente hasta unos 1000°C. Sin embargo, el uso de elementos de carburo de silicio permite alcanzar temperaturas de hasta 1300°C. En general, no se le recomienda para temperaturas inferiores a 650°C, a menos que esté equipado con ventiladores para circulación. La atmósfera puede ser natural o cualquiera preparada de acuerdo a lo requerido.

La **figura 8.4** muestra otro ejemplo popular de horno batch; es un horno de carga vertical, cuya área de trabajo está rodeada por tubos radiantes calentados por gas. Un ventilador en la base lo provee de convección. Los hornos de este tipo pueden calentarse por resistencia eléctrica y se adaptan al uso con una variedad de atmósferas preparadas.

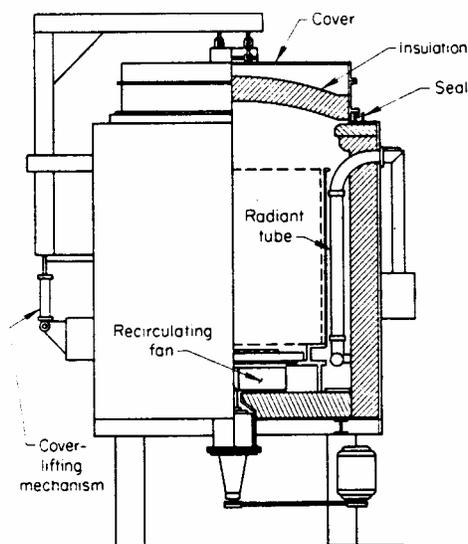


Figura 8.4.: Horno tipo batch de carga vertical

Existen muchos diseños de hornos Continuos, pero básicamente todos presentan un "extremo de entrada" y un "extremo de salida". Estos hornos están pensados para una producción continua de partes similares. En general se los diseña para manejar una amplia variedad de ciclos térmicos.

La **figura 8.5** muestra el extremo de carga de un gran horno continuo de hogar con rodillos. Las piezas son transportadas a través del horno por medio de rodillos. Si las piezas no son más largas que el espacio entre rodillos, se las coloca en bandejas o cestos. Los extremos de los rodillos se proyectan a través de las paredes del horno hacia apoyos externos refrigerados por agua o aire. Usualmente, los rodillos se mueven mediante un mecanismo de poleas y cadenas. Frecuentemente, los rodillos se extienden a alguna distancia de los extremos de carga y descarga.

Los vestíbulos de entrada y salida están equipados con un laberinto de cortinas verticales de asbesto para ayudar a confinar la atmósfera protectora.

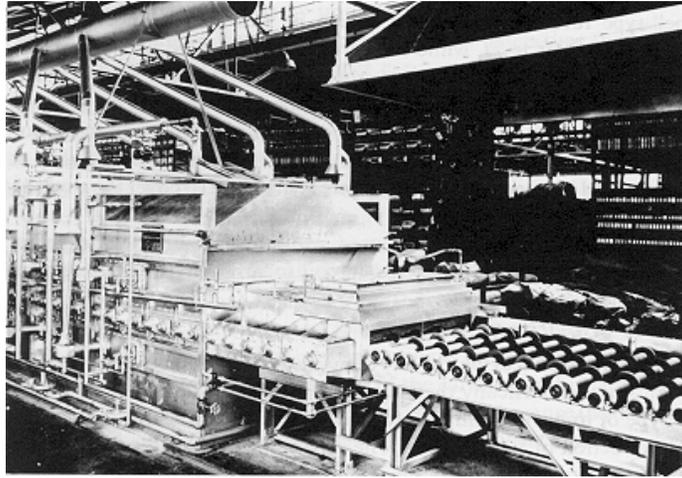


Figura 8.5.: Horno continuo de hogar en el que se observa el extremo de carga

Los hornos continuos tipo correa utilizan una correa para transportar las piezas. El tipo de correa utilizada depende del tamaño y peso de las piezas, y de las temperaturas de operación.

Los Hornos Continuos de Empuje están diseñados para manejar cargas unitarias mayores que los tipo correa. Un brazo mecánico que opera en el extremo de entrada empuja la carga periódicamente dentro del hogar. La carga se coloca en una bandeja o cesto que rueda sobre rieles o rodillos.

Los Hornos Continuos de Hogar Rotatorio constituyen una excepción a los hornos rectos, como lo muestra la **figura 8.6**. En este tipo de horno, el hogar es un anillo plano, similar al piso de un carrusel.

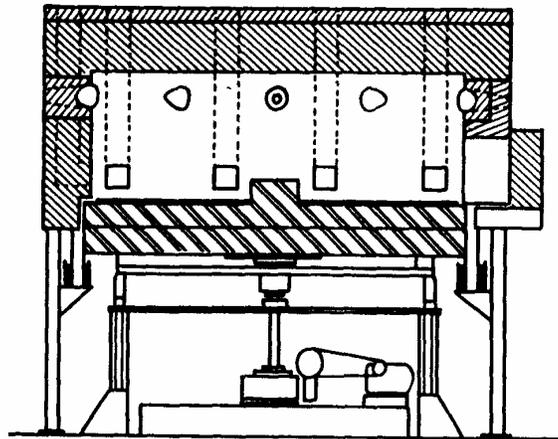


Figura 8.6.: Horno continuo de hogar rotatorio

El horno de la figura se calienta con tubos radiantes calentados por gas, pero también puede ser calentado eléctricamente. Una única apertura permite la carga y descarga de las piezas. La duración del ciclo térmico queda determinada por la velocidad de rotación del hogar. Aunque no tiene limitaciones en cuanto a aplicación, usualmente se le utiliza para calentar grandes piezas de trabajo.

8.4.: Clasificación de acuerdo al medio de transferencia de calor

Una forma de clasificar los hornos de tratamiento térmico es por el tipo de medio de transferencia empleado; esta clasificación es válida independientemente del tamaño y la mayoría de las variables comunes de los componentes del horno. Hasta hace poco, sólo se usaban dos medios de transferencia calórica: gaseoso y líquido (metal fundido o baño de sales fundidas). Ahora, los hornos de lecho fluidizado han probado ser una herramienta útil para tratamiento térmico, añadiendo un nuevo medio: sólido.

8.4a.: Atmósferas Gaseosas

En muchas operaciones de tratamiento térmico se debe proveer alguna forma de protección superficial a las piezas de trabajo, para evitar su oxidación y/o descarburización (en el caso de aceros). Por ejemplo, en aceros al carbono ocurre una oxidación severa sobre los 400 °C. En general, las atmósferas de los hornos sirven uno de los siguientes requerimientos: protegen las piezas tratadas, cuyas superficies están limpias y esencialmente sin modificación respecto de su condición previa (calentamiento neutral), o permiten lograr una condición controlada de cambio superficial (por ej. en operaciones de endurecimiento superficial). Cuando las piezas se calientan en baños de sales fundidas o lecho fluidizado, automáticamente quedan protegidas debido a que se encuentran inmersas. También es posible lograr cambios superficiales controlados en estos casos. A continuación se listan los tipos principales de atmósferas gaseosas que pueden utilizarse, en orden creciente de costo:

*Natural (aire convencional).

*Atmósferas derivadas de productos de combustión en hornos calentados directamente por combustible.

*Exotérmica (generada)

*Endotérmica (generada)

*Base nitrógeno

*Vacío

*Amoníaco disociado

*Hidrógeno seco (en tubos)

*Argón (en tubos)

8.4b.: Hornos de Baño Líquido

El calentamiento por inmersión de las piezas en un líquido representa un concepto totalmente diferente a los hornos de atmósfera gaseosa. Una práctica antigua era la de sumergir la pieza en un metal líquido (usualmente plomo). Esta práctica utilizada fundamentalmente con aceros ha sido desplazada por el uso de sales fundidas debido a que el plomo es muy denso, por lo cual las piezas tienden a flotar, y además el plomo se adhiere a la superficie del acero dificultando algunos tratamientos (como el temple) e imponiendo problemas de limpieza.

Los baños de sales fundidas se utilizan como un medio eficiente de calentar metales, principalmente aceros, aunque algunas composiciones son compatibles con metales y aleaciones no ferrosas. Las sales fundidas ofrecen varias ventajas: (1) los distintos tipos de sales ofrecen en conjunto un rango de operación de 175°C a 1260°C; (2) la superficie de las piezas queda totalmente protegida; (3) para el caso del temple, este se ve facilitado gracias a que una delgada película de sal permanece en la superficie durante la

transferencia desde el horno al medio de temple; (4) Existe una amplia variedad de sales, incluyendo las que pueden cambiar la condición superficial del acero.

La desventaja principal de calentar piezas en sales fundidas es la necesidad de limpiar aquellas después del tratamiento, lo cual puede ser difícil, especialmente en piezas de geometría compleja.

Existe una variedad de sistemas de calentamiento que se utilizan para los baños de sales. El más simple, aplicable a temperaturas de 175 a 350°C, involucra a un recipiente metálico con calefactores eléctricos de inmersión, lleno de una sal de bajo punto de fusión. Para mayores temperaturas se requieren equipos más sofisticados. La **figura 8.7a** muestra un horno calentado con combustible, utilizable hasta 900 °C. Se pueden lograr mayores temperaturas, pero los componentes del horno se deterioran en exceso. El horno mostrado en la **figura 8.7b** es similar al anterior, excepto que se calienta mediante resistencia eléctrica. Aquí el recipiente está rodeado constantemente por una atmósfera oxidante, de modo que su vida útil se acorta bastante al ser usado a altas temperaturas.

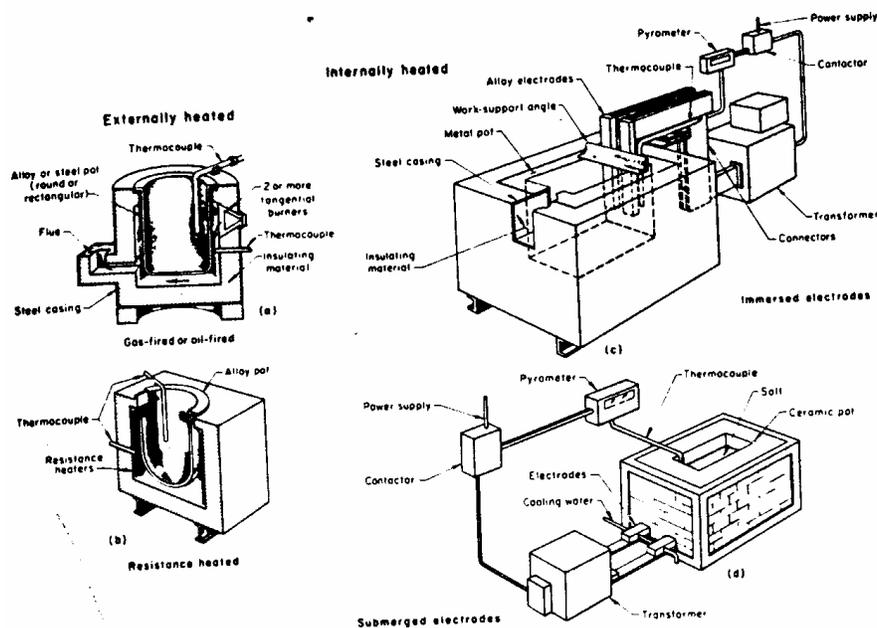


Figura 8.7.: Principales tipos de hornos de sales

Ambos tipos de hornos son muy versátiles, pero su mejor uso se encuentra en la producción limitada de pequeñas partes. Además, los recipientes deben ser hechos de una aleación níquel-cromo de alto costo para que tengan una vida útil aceptable.

Los hornos de la **figura 8.7c** y **8.7d**, tipos electrodo inmerso y sumergido, respectivamente, se utilizan en la mayoría de los tratamientos que requieren temperaturas de 750 a 1250°C. En ambos tipos el calor es generado por resistencia al flujo de corriente a través de la sal fundida desde un electrodo a otro. Esto crea una agitación en el sector de los electrodos, produciendo, así, temperaturas uniformes dentro del baño.

Ambos tipos compiten entre sí, cada uno con sus ventajas y desventajas. Los dos se prestan para operación batch o continua, aunque la primera presenta dificultad en el reencendido cuando se permite que las sales solidifiquen. Una desventaja principal del tipo electrodo inmerso es que los electrodos se deterioran

justo sobre la línea de sal donde el calor es intenso. El tipo electrodo sumergido no posee esta desventaja; sin embargo, requiere un recipiente de cerámica refractaria, y éstas no son compatibles con todas las composiciones de sales.

Los hornos de sales se calientan por radiación y conducción. En los tipo electrodo inmerso y sumergido se añade la convección debido a la agitación generada. Por lo tanto, la velocidad de calentamiento en cualquier baño de sal es mucho mayor que en los hornos de atmósfera gaseosa.

8.4c.: Hornos de Lecho Fluidizado

El enfoque más reciente para calentar metales es la utilización de un lecho fluidizado. Este calentamiento se lleva a cabo en un lecho de partículas inertes, usualmente óxido de aluminio. Las partículas se encuentran suspendidas por la combustión de una mezcla combustible/aire que fluye hacia arriba a través del lecho. Los componentes se encuentran inmersos en este lecho fluidizado como si fuera un líquido y se calientan por la acción del lecho fluido caliente. Las velocidades de transferencia calórica en un lecho fluidizado son hasta diez veces superiores a las alcanzadas en hornos convencionales de calentamiento directo. También son mayores que las obtenidas en baños de sales. La combinación de una alta transferencia calórica, excelente capacidad térmica, y uniformidad de comportamiento sobre un amplio rango de temperaturas provee de un baño de temperatura constante para muchas aplicaciones. Adicionalmente, las partículas del lecho no se adhieren a las piezas, de modo que no hay problemas de limpieza, ni hay arrastre de partículas fuera del lecho, en comparación al arrastre constante (y necesidad de rellenado) de sal desde un baño de sales. Esto puede significar un factor de costo favorable al uso del lecho en tratamientos térmicos. En realidad, los lechos fluidizados pueden adaptarse a todo tipo de tratamientos, tanto en materiales ferrosos como no ferrosos.

Aunque el tratamiento térmico en lecho fluidizado fue patentado en 1950, su uso se veía restringido por el hecho de que sólo se podía calentar los lechos por medios eléctricos, haciendo difícil e ineficiente el calentamiento sobre 700 °C. Con la introducción de lechos calentados por combustible, que utilizan una mezcla gas/aire como medio de calentamiento y fluidización a la vez, se dispone ahora de hornos que realizan todos los tratamientos estándares.

Hay dos tipos de lechos fluidizados: de calentamiento interno para aplicaciones de alta temperatura (750 a 1200 °C) y de calentamiento externo para temperaturas inferiores a 750 °C.

En el lecho calentado internamente (**figura 8.8a**), se mezclan el combustible y el aire en proporciones casi estequiométricas, y pasan a través de una placa cerámica porosa sobre la cual se fluidizan las partículas en la corriente gaseosa. Esta corriente imparte energía térmica a las partículas del lecho que a su vez la imparten al objeto en tratamiento. El lecho fluidizado se mantiene dentro de un contenedor cerámico o de metal. La mezcla combustible se enciende inicialmente en la parte superior; el frente de llama se mueve gradualmente hacia abajo hasta estabilizarse a unos 3 cm. sobre la placa cerámica. Esta placa de distribución asegura propiedades uniformes dentro del lecho.

En el lecho calentado externamente (**figura 8.8b**), un quemador con aire en exceso realiza la combustión en una cámara de pleno, sobre la cual el lecho fluidizado es soportado por una placa cerámica porosa. El lecho es fluidizado por los productos de combustión provenientes de la cámara de pleno.

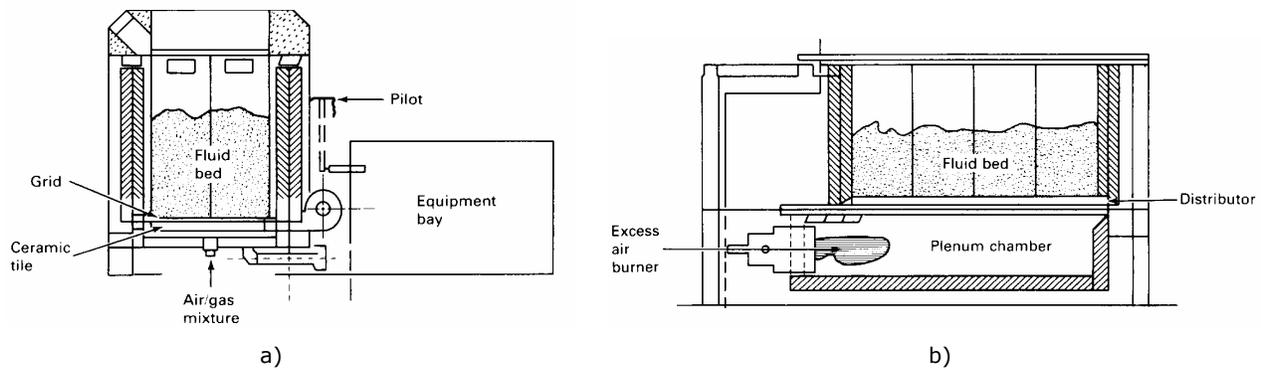


Figura 8.8.: Hornos de lecho fluidizado. a) Calentado internamente y b) Calentado externamente

Un sistema que mide la cantidad apropiada de mezcla gas/aire que va a la losa de distribución, controla automáticamente la temperatura del lecho. El gas de fluidización conforma, además, la atmósfera del horno. Esta puede ser inerte, oxidante o reductora dependiendo de la regulación de la razón gas/aire que va a la losa de distribución.

8.4d.: Hornos de Vacío.

Se ha listado previamente al vacío como una de las atmósferas gaseosas utilizables en tratamientos térmicos. Sin embargo, es válido clasificarlos en forma separada ya que mientras que, en general, los distintos tipos de hornos se pueden adaptar a una o más atmósferas, el vacío requiere de hornos específicamente diseñados para su uso, independientemente de que puedan también usar otras atmósferas, como argón, nitrógeno o hidrógeno.

Resulta virtualmente imposible alcanzar un vacío total (absolutamente nada del aire original) en los hornos al vacío. Una atmósfera estándar a nivel del mar es igual a 760 mm de mercurio. El nivel de vacío usado en la mayoría de los tratamientos es de aproximadamente 1/760 de una atmósfera. Bajo estas condiciones, la cantidad del aire original remanente es de aproximadamente un 0,1%. Este vacío se puede alcanzar mediante bombeo con una bomba mecánica. Cuando se requieren vacíos superiores a ese (menos del 0,1%), al bombeo mecánico lo sigue el uso de la altamente sofisticada bomba de difusión.

Para evitar la pérdida de resistencia de las paredes debido a las elevadas temperaturas (lo que haría al horno susceptible de sufrir una implosión bajo vacío), éstas son refrigeradas por agua. La **figura 8.9** muestra cortes lateral y transversal de un modelo de horno de pared fría. Este horno de tres cámaras incluye un vestíbulo de carga (izquierda en el corte lateral), una cámara de calentamiento (centro), y un sistema con elevador para temple. Los hornos al vacío se calientan por resistencia eléctrica, usualmente con elementos de grafito o tungsteno.

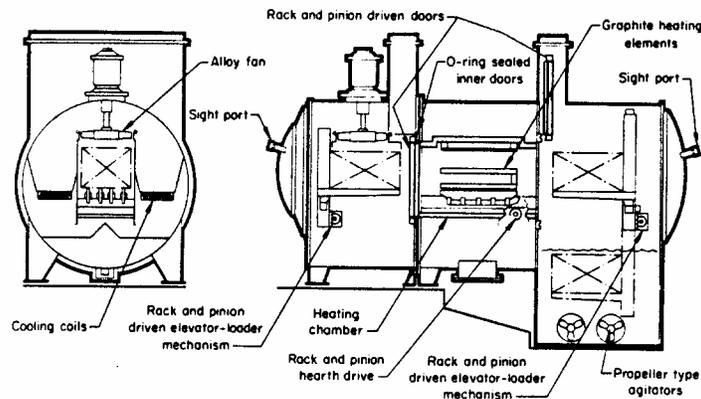


Figura 8.9.: Horno de vacío de pared fría

Los hornos al vacío ofrecen un número de ventajas que incluyen su versatilidad, y ciertas economías de operación. Sus principales desventajas son el alto costo inicial del equipo y una cierta medida de preparación y habilidad del operario.

8.5.: Hornos para fusión

8.5a.: Hornos eléctricos

La idea de la construcción de hornos eléctricos comenzó a tomar forma a mitad del siglo XVIII. Su utilización efectiva a escala industrial se inició solamente después de 1900, obteniéndose su máxima aceptación después de la 2ª Guerra Mundial, cuando la energía eléctrica comenzó a disminuir de precio tornándose competitiva con los combustibles tradicionales.

i) Ventajas y Desventajas del Calentamiento Eléctrico

Ventajas:

- a) Eficiencia: El coeficiente de conversión de electricidad en calor es prácticamente 100%, lo que no ocurre con el uso de combustibles comunes, donde parte de la energía es consumida en el calentamiento del aire y de los gases calientes que son expulsados a la atmósfera.
- b) Limpieza: No hay contaminación por los productos de combustión. No hay chimeneas, gases, suciedad, polvos o cenizas en hornos a resistencia o inducción.
- c) Facilidad de Control: el control de la calidad de calor suministrado al sistema es mucho más simple y más preciso que en cualquier otra forma de calentamiento.
- d) Control de la Temperatura: mucho más exacto.

e) Altas Temperaturas: facilidad de obtención de altas temperaturas imposibles de conseguir económicamente en otros hornos.

Desventajas:

- a) Alta inversión inicial
- b) Necesita mano de obra calificada.

ii) Uso del Calentamiento Eléctrico

Se utiliza calentamiento eléctrico cuando el proceso exige características especiales como:

- Altas temperaturas.
- Extrema precisión del control de las temperaturas.
- Total ausencia de contaminantes en el baño metálico.

iii) Clasificación de los Hornos Eléctricos

Los varios tipos de hornos eléctricos usados actualmente en las industrias metalúrgicas pueden clasificarse como sigue:

1) Hornos de Resistencia

- a) Hornos de resistencia no metálica y de electrodo radiante (**figura 8.10a**)
- b) Hornos de resistencia metálica (**figuras 8.10b y 8.10c**).

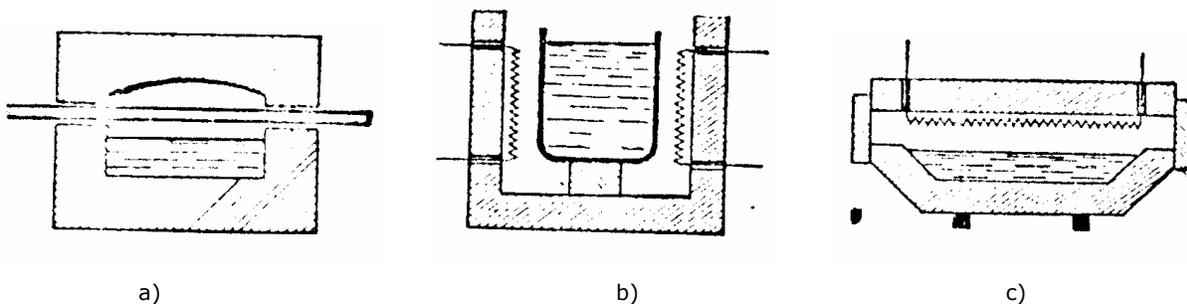


Figura 8.10.: a) Horno radiante de resistencia no metálica, b) horno de crisol con resistencia metálica, c) horno de cámara con resistencia metálica.

2) Hornos de Arco

- a) Hornos de arco directo monofásicos (**figura 8.11a**) y trifásicos (**figura 8.11b**).
- b) Hornos de arco indirecto monofásicos (**figura 8.11c**).

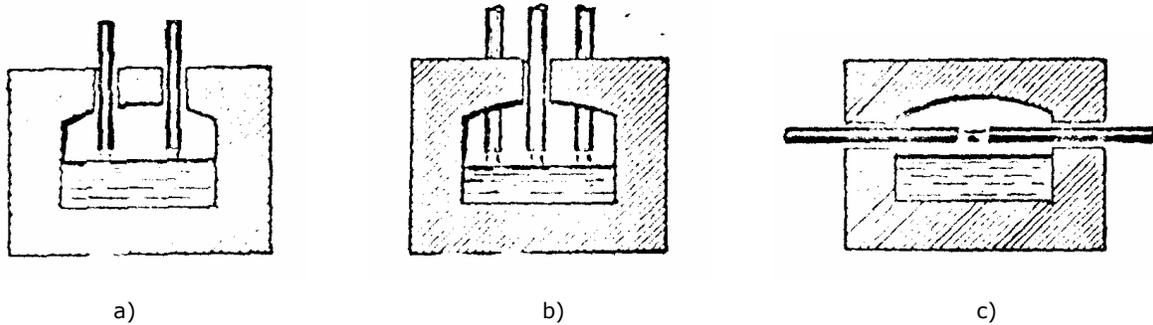


Figura 8.11.: a) Horno de arco directo monofásico, b) horno de arco directo trifásico, c) horno de arco indirecto monofásico

3) Hornos de Inducción

- a) Hornos de inducción con núcleo magnético (**figura 8.12a**).
- b) Hornos de inducción sin núcleo magnético (**figura 8.12b**).

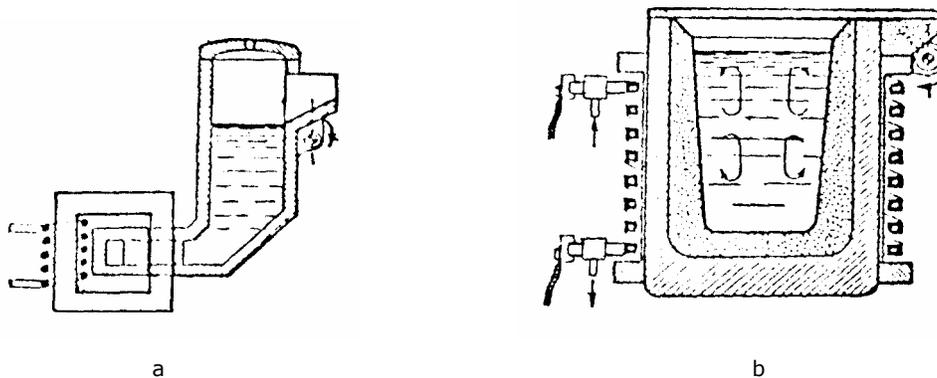


Figura 8.12.: Hornos de inducción. a) con núcleo magnético y b) sin núcleo magnético.

1) Hornos de Resistencia

Se definen como hornos de resistencia aquellos que utilizan el calor disipado por efecto Joule en una resistencia ohmica, que puede estar constituida por la carga misma a ser calentada (hornos de calentamiento directo) o por resistencias adecuadas independientes de la carga (hornos de calentamiento indirecto), por las cuales circula corriente eléctrica.

En los hornos de calentamiento directo, el material se coloca entre dos electrodos (en contacto directo con ellos), ofreciendo una resistencia al paso de la corriente, y calentándose. Entre otras, estos hornos encuentran aplicación en la fabricación de electrodos de grafito, en el tratamiento térmico de metales y en hornos de sales para la cementación de aceros.

En los hornos de calentamiento indirecto, el material es calentado por radiación, por convección y/o por conducción mediante resistencias colocadas de forma adecuada. La carga a calentar y las resistencias se encuentran contenidas en una cámara aislada térmicamente por medio de materiales refractarios y aislantes. En la **figura 8.13** se destacan los elementos principales de un horno de resistencia de calentamiento indirecto y el curso del flujo térmico.

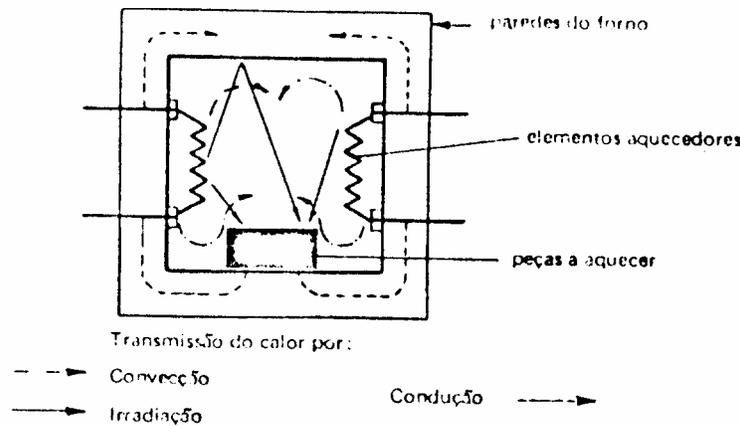


Figura 8.13.: Horno de resistencia con calentamiento indirecto.

Entre las aplicaciones metalúrgicas de estos hornos se encuentran la fusión y mantención de temperatura de metales (aluminio, plomo zinc, estaño, cobre, etc.) y el tratamiento térmico de metales.

Los hornos indirectos se pueden clasificar en función de su utilización:

- Procesos de fusión (ver **figura 8.10a, b y c**)
- Mantención de cargas líquidas (ver **figura 8.14**)
- Calentamiento de cargas sólidas (ver fig. correspondiente en la sección "hornos para tratamiento térmico")

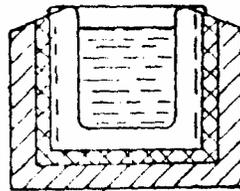


Figura 8.14.: Horno de crisol con calentamiento externo.

Los materiales para resistencia deben poseer, entre otras características, una elevada resistividad eléctrica, alta temperatura de fusión, y resistencia a la oxidación en caliente y a la corrosión en el ambiente gaseoso producto de las reacciones químicas en juego. El tipo de resistencia a escoger para un horno dado se halla ligado principalmente a la temperatura de trabajo de éste. Se tienen:

a) Resistencias metálicas.

a.1) Aleaciones austeníticas. Son aleaciones Ni-Cr-Fe para temperaturas de hasta 850°C, dependiendo de los contenidos de estos elementos, u 80Ni-20Cr para temperaturas de 850 a 1100°C

a.2) Aleaciones ferríticas. Son aleaciones Cr-Fe-Al (Supercalor, Kanthal, etc.) para temperaturas de 1100 a 1300°C.

b) Resistencias no metálicas.

b.1) Tubos a base de carburo de silicio para temperaturas de hasta 1500 °C

b.2) Silicato de molibdeno para temperaturas de hasta 1700 °C.

b.3) Grafito y molibdeno (en pastillas, cilindros o granulados en tubos) para temperaturas de hasta 1800°C.

Las resistencias metálicas se utilizan en forma de hilos con diámetros variables de fracción de mm a unos 6 mm, comúnmente enrollados en forma helicoidal (**fig. 8.15a**), o en forma de cintas dispuestas en zig-zag (**fig. 8.15b**).

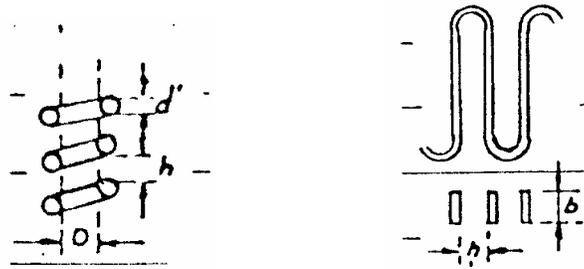


Figura 8.15.: Formas de las resistencias metálicas. a) Helicoidal, b) Zig-Zag

Por su parte, las resistencias no metálicas están constituidas por astas (o tubos) fijados horizontalmente entre dos paredes del horno o verticalmente entre el suelo y la cubierta (**figura 8.16a y b**).

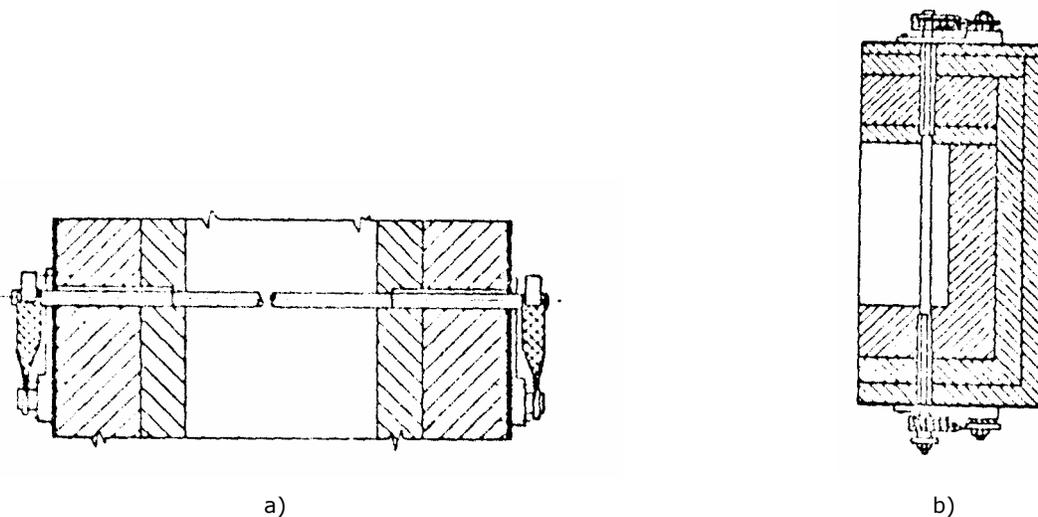


Figura 8.16.: Posición de las resistencias no metálicas en los hornos. a) Montaje horizontal; b) montaje vertical.

2) Hornos de Arco

En este tipo de hornos se forma un arco voltaico entre dos electrodos o entre el electrodo y la carga a fundir. El flujo de la corriente eléctrica se da a través del aire ionizado y las partículas de carbono que volatilizándose por la alta temperatura, 3500 °C, forman un plasma proporcionando, de esta forma, el arco voltaico.

Existen dos tipos de horno de arco: horno de arco indirecto y horno de arco directo

2a) Horno de Arco Indirecto (electrodo x electrodo): En estos hornos el calentamiento directo es por radiación. Los hornos pueden ser del tipo Basculante rotativo o Basculante oscilante, siendo el más común el oscilante. Debido al esfuerzo de flexión y choques mecánicos a que están sujetos los electrodos, estos hornos tienen una capacidad limitada a un máximo de 2000 Kg. carga sólida a 4000 Kg. carga líquida.

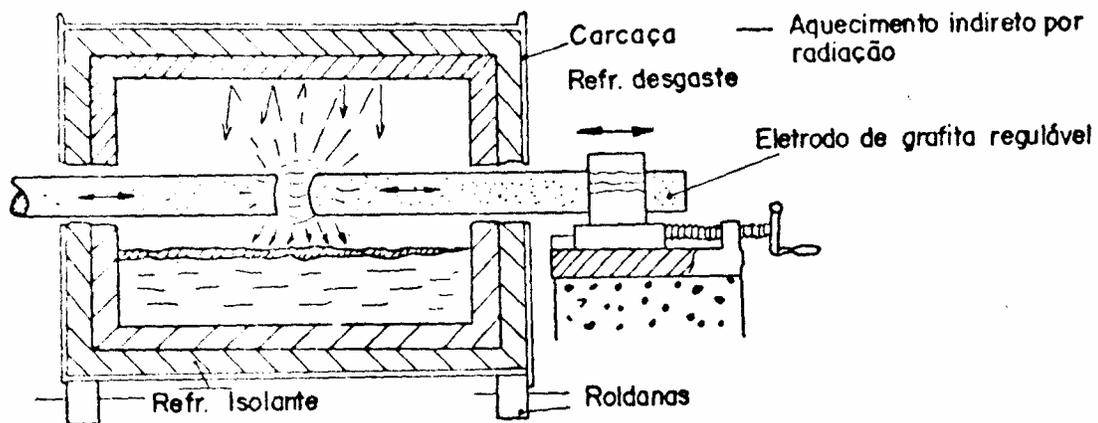


Figura 8.17.: Horno eléctrico de arco indirecto

Características Operacionales: La potencia es del orden de 50 a 1000 kVA. En la fusión de acero se gasta, en promedio, 10 - 12 Kg de electrodo por tonelada, en un tiempo de fusión que varía de 50 a 90 minutos. El arco se obtiene por la aproximación de los electrodos (manualmente en los hornos más pequeños, hidráulicamente en los más grandes). El horno se precalienta, y luego se carga. En la medida que ocurre la fusión del metal cargado, se recarga. Sólo después que todo está líquido se inicia la oscilación para transferir mejor el calor de las paredes al metal y evitar que se enfríe mucho el fondo.

2b) Horno de Arco Directo (electrodo x baño x electrodo): Son los hornos de arco más usados en la industria del acero y fundición. Existen dos tipos:

- 1) Hornos Básicos: Son los más importantes y los más usados en la fabricación de aceros de calidad. La solera es de magnesita y dolomita.
- 2) Hornos Ácidos: Se utilizan en la producción de fundiciones y aceros comunes. La solera es de sílice.

En la **figura 8.18** se muestra un horno trifásico.

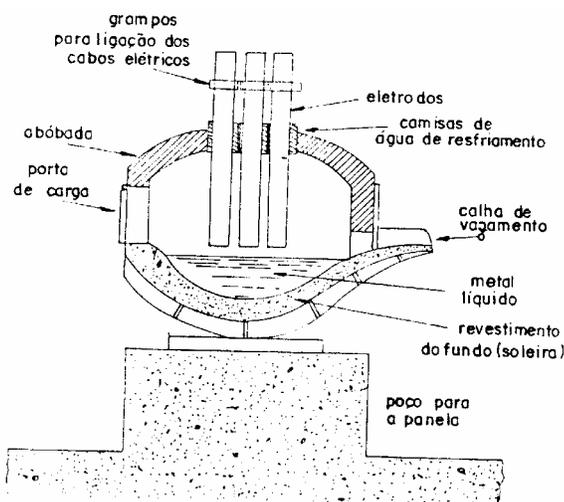


Figura 8.18.: Horno eléctrico de arco directo trifásico.

La capacidad de estos hornos varía desde 1000 Kg a 400 Ton. La potencia de los transformadores y hornos empleados varía con el tamaño de los hornos desde 1000 a 120000 KVA. El consumo de energía eléctrica varía desde unos 800 a 650 KW/Ton de acero, dependiendo de la capacidad de fusión (**figura 8.19**).

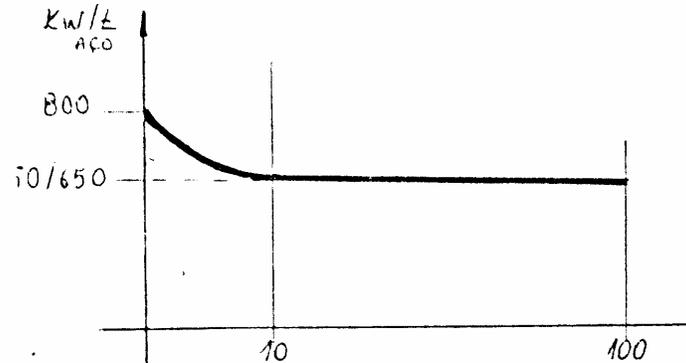


Figura 8.19.: Consumo de energía eléctrica en función de la capacidad de fusión de los hornos de arco directo.

Los hornos de arco directo utilizan electrodos de grafito con un consumo de 1 a 3 Kg/Ton de acero común y 3 a 6 Kg/Ton de acero inoxidable. Durante la fusión, los electrodos están en constante movimiento de modo de seguir la fusión de la carga, mantener la corriente eléctrica en condiciones de máxima eficiencia, evitar el corto circuito con la carga y evitar la carburación del baño.

3) Hornos de inducción

3a) Hornos de Inducción sin Núcleo

La circulación de la corriente eléctrica en cualquier conductor genera un campo electromagnético a su alrededor. En el caso que este conductor tenga forma de bobina (solenoides), el campo electromagnético generado tendrá la configuración de la **figura 8.20a**, o sea, concentrado y con sentido único en el interior de la bobina, mientras que en el lado externo tiene tendencia a dispersarse.

Si en el interior de esta bobina existe un núcleo de material metálico, éste será sede de corrientes parásitas (corrientes de Foucault), las cuales lo calientan. Ver **figura 8.20b**.

Para evitar que haya sobrecalentamiento de las estructuras metálicas externas a la bobina por la acción del campo electromagnético disperso, la bobina es circulada por núcleos constituidos de acero al silicio que conducen el campo externo evitando su dispersión y actuando como blindaje. La **figura 8.20c** muestra esta configuración.

Colocando en el interior de la bobina, en vez de la pieza metálica de las figuras anteriores, un crisol de material refractario con una carga metálica, se puede aumentar la potencia de la bobina al punto de que las corrientes inducidas fundan esa carga. La figura 8.20d muestra el conjunto del crisol con el metal circundado por la bobina y los núcleos de acero al silicio.

Se puede decir que la bobina actúa como el primario de un transformador y el sólido metálico en su interior representa el secundario. Las transformaciones de energía en este tipo de horno son:

- en el primario: de energía eléctrica en magnética.
- en el secundario: de energía magnética en eléctrica y, finalmente, de energía eléctrica en calor.

El calentamiento por inducción utiliza las propiedades del campo magnético para la transferencia de energía eléctrica en energía calorífica, sin recurrir al contacto directo. La bobina de los hornos de inducción es de cobre. Se consigue un mayor rendimiento en la fusión del material, producto del campo eléctrico, cuanto más delgada sea la pared refractaria. Debido a esto, la bobina debe ser refrigerada internamente con agua. La temperatura de la bobina no debe pasar los 45 °C, ya que a los 60 °C se favorece la formación de incrustaciones que tienden a cerrar los canales.

La intensidad de las corrientes inducidas es función de la potencia de la bobina, que a su vez es proporcional al volumen de material a ser fundido.

La frecuencia de alimentación de la bobina es uno de los parámetros importantes de los hornos a inducción, cuya definición está íntimamente ligada a la aplicación del horno.

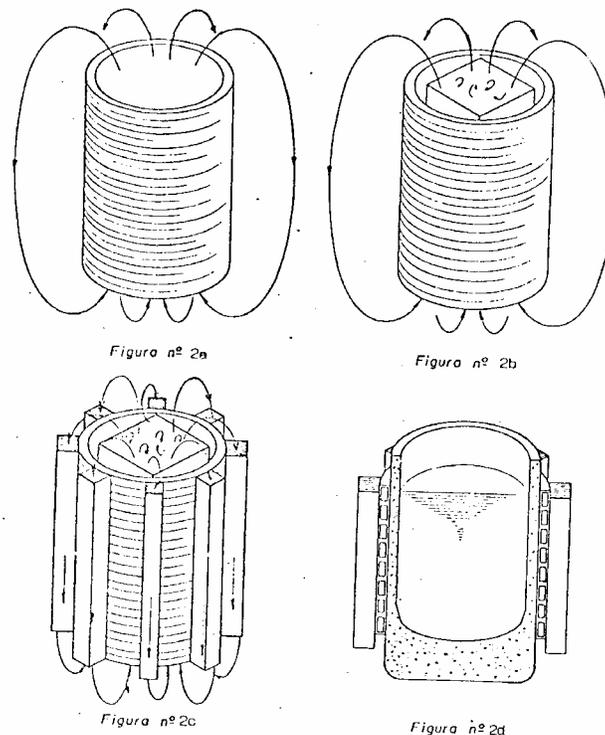


Figura 8.20.: Principio de funcionamiento del horno de inducción

De la fórmula simplificada de abajo, que define la fuerza electrodinámica generada en el baño, conforme lo muestra la **figura 8.21.:**

$$F = K \frac{P}{fV}$$

donde:

F = fuerza electrodinámica

P = potencia de la bobina

f = frecuencia

V = tensión

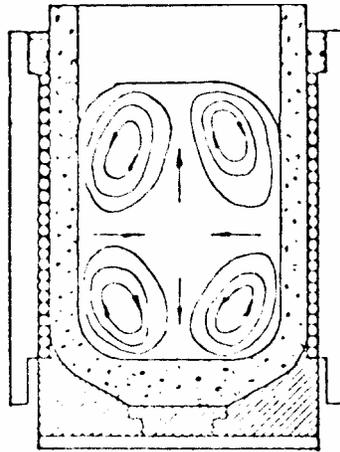


Figura 8.21.: Agitación del baño

se puede concluir que la agitación del baño provocada por esta fuerza es inversamente proporcional a la frecuencia de la bobina.

La importancia del movimiento del baño está en que el mismo se mantiene siempre homogéneo, y la absorción de adiciones como ferro-aleaciones o elementos químicos es siempre más eficiente que en otros tipos de hornos.

Al proyectar la instalación de un horno se debe considerar con un máximo de atención el cálculo de ese movimiento, dado que para hornos pequeños y para metales menos densos el movimiento debe ser menor; o sea, la penetración del campo debe ser menor.

Los hornos de inducción se pueden clasificar por su frecuencia de trabajo, como sigue:

- Hornos de baja frecuencia o frecuencia industrial: 50 ó 60 Hz (c/s); 150 ó 180 Hz; 200 Hz.
- Hornos de media frecuencia: 200 a 10000 Hz.
- Hornos de alta frecuencia: sobre 10000 Hz.

Generalmente los hornos de baja frecuencia son utilizados para la fusión, mantenimiento y sobrecalentamiento de hierro y sus aleaciones, aluminio y sus aleaciones, bronce, latón, etc. Normalmente estos hornos mantienen metal líquido los fines de semana, trabajando a baja potencia, pues la partida con carga sólida es muy lenta. Debido a esto, el cambio de aleación en el horno se torna más difícil, por la probable contaminación.

Los hornos de media frecuencia pueden ser utilizados para la fusión de cualquier tipo de aleaciones, tanto ferrosas como no ferrosas (fundiciones, aceros al carbono y especiales, Al y sus aleaciones, Cu y sus aleaciones, oro, plata y sus aleaciones, aleaciones nobles, etc), siempre utilizado en refusión (no puede ser usado para fundir minerales). Pueden usarse como hornos de calentamiento en duplex con cubilote u hornos de arco, como horno al vacío, etc. Estos hornos son adecuados cuando se quiere partir de carga sólida y cuando se quiere fundir varios tipos de aleaciones en el mismo horno, supuesto una secuencia adecuada para minimizar las contaminaciones.

Los hornos de alta frecuencia son utilizados en laboratorio y en calentamiento de piezas para tratamiento térmico.

En un sistema de fusión inductiva los parámetros que están íntimamente ligados son:

- material a ser fundido, determinado por el usuario.
- tamaño del horno, determinado, generalmente, por el tamaño de la mayor pieza producida.
- potencia, según la producción por hora necesaria.
- frecuencia, de acuerdo con los tres parámetros anteriores.

En función de dichos parámetros, el fabricante podrá determinar la mejor combinación y suministrar el equipamiento más adecuado.

Los hornos de baja frecuencia normalmente son de gran capacidad, de unas 6 a 60 tons. con potencias de 1000 a 17000 KW.

Los hornos de media frecuencia varían desde pocos kilogramos (p. ej. 2 Kg) a 10000 Kg, con frecuencias entre 200 Hz a 10000 Hz, y potencias desde unos pocos KW (p. ej. 3 KW) a 3000 KW o más.

Para hornos de inducción de media frecuencia, el consumo de energía para la fusión de diversas aleaciones es aproximadamente:

acero	= 620 KWh/ton.
fundición	= 580 KWh/ton.
bronce	= 420 KWh/ton.
aluminio	= 610 KWh/ton.

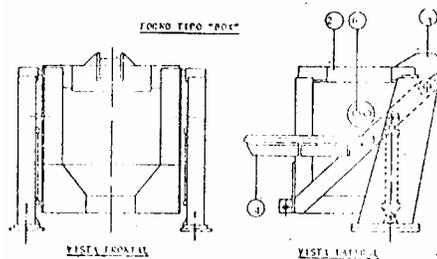
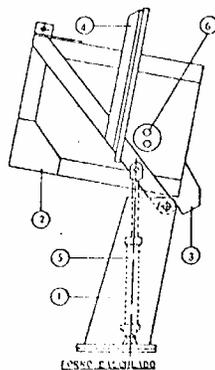


Figura 6 - Forno tipo "BOX" (6)



LEGENDA

1. Pedestal
2. Carcaça
3. Bica
4. Plataforma de Trabalho
5. Cilindro Hidráulico de basculamento
6. Entrada de Energia

Figura 8.22.: Horno tipo Box (media frecuencia)

8.6.: Hornos de crisol.

El horno de crisol es un equipo utilizado principalmente para la fusión de metales no ferrosos. En este equipo el metal a ser fundido se encuentra en el interior de un crisol fabricado de grafito o carburo de

silicio. Este crisol se posiciona en el interior de la cámara de combustión cilíndrica, que a su vez está formada internamente por un revestimiento refractario y externamente por una carcasa de chapa de acero, como lo esquematiza la **figura 8.23**. El revestimiento refractario normalmente se confecciona a partir de ladrillos especiales y posee la finalidad de resistir el elevado calor existente en el interior de la cámara de combustión, mientras que la carcasa tiene la finalidad de sustentar todo el conjunto. El interior de la cámara de combustión debe ser perfectamente cilíndrico para permitir la distribución uniforme del calor.

El crisol se posiciona en el centro de la cámara de combustión y se apoya sobre un pedestal, también confeccionado a partir de material refractario. Sobre el horno existe una tapa para evitar las pérdidas de calor e impedir la salida libre de la llama.

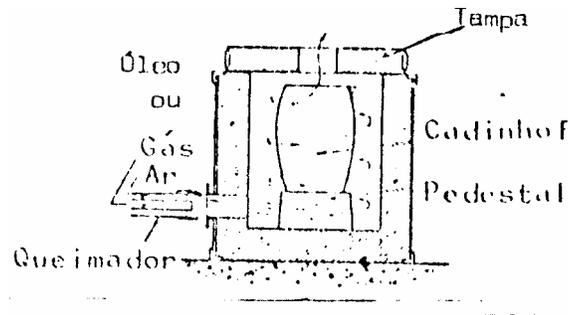


Figura 8.23.: Modelo esquemático de un horno de crisol.

Otra característica importante es que el metal prácticamente no entra en contacto con la fuente de calentamiento (hecho por vía indirecta), y por esto, está sujeto a poca contaminación.

8.6a.: Tipos de horno de crisol

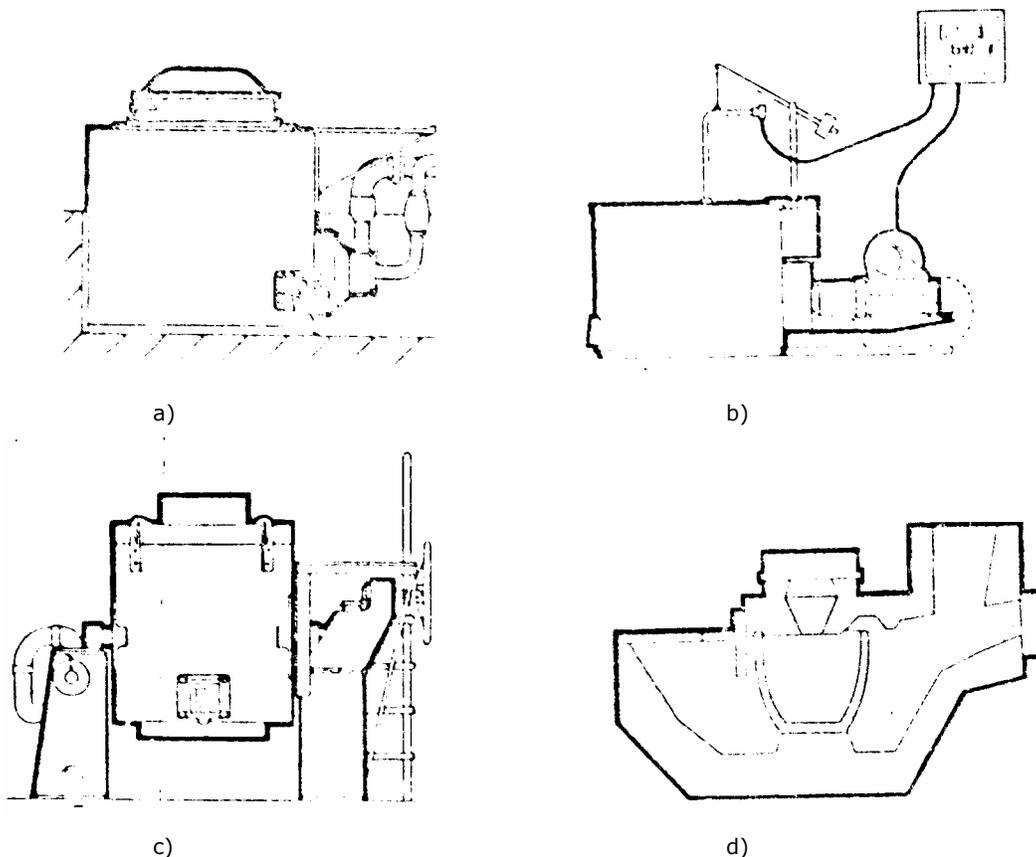
Los diferentes tipos de horno de crisol se pueden definir de la siguiente manera:

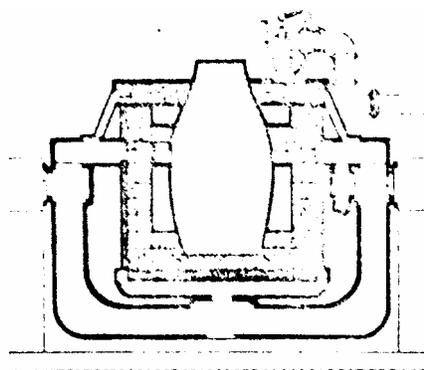
- 1) Hornos - pozo, **figura 8.24a**: El crisol es removido del horno y llevado hasta los moldes para vaciar el metal. Este horno se puede construir sobre o bajo el nivel del suelo. En ambos casos el horno es fijo. Existen en una variedad de tamaño para acomodar crisoles desde 15 a 150 kg de capacidad de latón. Son extremadamente flexibles, tanto en relación a las aleaciones como a las cantidades. Se pueden usar crisoles distintos para diferentes aleaciones y, hasta cierto punto, crisoles de distinto tamaño en un mismo horno.
- 2) Hornos Bale-out (de espera), **figura 8.24b**: El metal es retirado del crisol con cucharas y transferido a los moldes. Se utilizan, principalmente, para fundición bajo presión, donde se necesitan pequeñas cantidades a intervalos frecuentes. Capacidades típicas en el rango de 50 a 500 kg de aluminio y 110 a 330 kg de latón. Rendimiento máximo: 240 kg de aluminio por hora.
- 3) Hornos Basculantes, **figura 8.24c**: Son hornos móviles apoyados sobre un sistema de sustentación. Usualmente se les utiliza cuando es necesaria una producción relativamente grande de una aleación determinada. El metal es transferido a los moldes en una cuchara o un crisol precalentado, con la excepción de casos especiales en que es vaciado directamente. El tipo original de horno basculante, con capacidades de 70 a 750 kg de latón, bascula en torno a un eje central. Su desventaja es que el punto de descarga

acompaña el movimiento basculante. Para superar este inconveniente se desarrolló un horno basculante de eje en la piquera, con capacidad de 200 a 750 kg de latón, y el modelo moderno es basculado por pistones hidráulicos, otorgando la ventaja de un mayor control en la operación de vaciado.

4) Horno de crisol inmerso, **figura 8.24d**: Es el inverso del horno normal de crisol, en el sentido de que la llama quema dentro del crisol que está inmerso en el baño de aleación de zinc o aluminio, el cual se encuentra en un recipiente refractario. Estos hornos son fabricados con capacidad de fusión de 300 a 1000 kg de aluminio por hora. Sus ventajas principales respecto de hornos de llama abierta son una mayor eficiencia, que alcanza a un 40%, y pérdidas de metal de tan sólo un 1 ó 2%, otorgando una considerable economía financiera.

5) Horno rotativo de crisol, **figura 8.24e**: Se utilizan para la recuperación de viruta, escoria y otros tipos de chatarra menuda. el horno contiene un crisol con forma de garrafa, con capacidad de 300 kg de limadura de latón y trabaja a un ángulo aproximado de 50° con respecto a la vertical. El cuerpo del horno y el crisol giran constantemente durante la fusión, trayendo el metal para el lado caliente del crisol y tirando la limadura no fundida hacia adentro y abajo del metal ya fundido. De esta forma, la rotación proporciona una fusión más rápida y también evita la adhesión de la carga a las paredes del crisol, como ocurre frecuentemente con los hornos convencionales. El formato del crisol, y especialmente el cuello estrecho, junto con las condiciones neutras o reductoras dentro del crisol, virtualmente eliminan las pérdidas por oxidación de las cargas y aseguran una alta recuperación de metal (un porcentaje típico es la recuperación de un 94% del metal de limadura de latón 60/40, conteniendo 3% de aceite).





e)

Figura 8.24.: Distintos tipos de hornos de crisol

La selección del tipo y tamaño de horno dependerá de la aplicación (por ej. si es para fusión o mantención), del número de aleaciones, la producción diaria de cada aleación, la mayor pieza a ser fundida, la continuidad de alimentación de metal, el tipo de combustible.

8.6b.: Formas de calentamiento en los hornos de crisol

En relación a la forma de energía utilizada, los hornos de crisol pueden ser operados básicamente a través de energía eléctrica o de combustibles. En relación a la energía eléctrica, los hornos más comunes son de resistencia y de inducción. En cuanto a los combustibles, se puede utilizar una serie de formas diferentes (ver **tabla 1**). Cada forma de energía, sea eléctrica o en forma de combustible, posee sus ventajas y desventajas que deben ser aprovechadas o evitadas de acuerdo con las condiciones de producción exigidas, o en función de la política de abastecimiento adoptada por la empresa.

Tabla 1.: Principales tipos de combustible que pueden ser usados en la operación de los hornos de crisol.

Combustible	Tipo	Poder Calorífico (Kcal/Kg)
Sólido	Leña	3800
	Carbón mineral	4000 a 6000
	Coque de fundición	6200 a 7500
	Coque de petróleo	8000
	Carbón vegetal	6500 a 7000
Líquido	Gasolina	10200
	Petróleo diesel	11000 Kcal/litro
	Alcohol etílico	7300
	Querosene	11600
	Petróleo - Fuel-oil - OC4	9820 10000
Gaseoso	Gas licuado	10900
	Gas de coque	4500
	Gas natural	10000
	Metano	8500

En la práctica, los combustibles más utilizados son petróleo y gas. El petróleo no combustiona en su estado líquido original; la manera de alcanzar una gasificación rápida consiste en proyectarlo finamente

subdividido hacia el interior de la cámara de combustión. El elemento mecánico que realiza tal operación es el quemador. Los quemadores de petróleo deben cumplir los siguientes objetivos:

- Pulverizar el petróleo en gotitas cuyos diámetros varían desde unos 30 a 150 micrones (1 micrón = 0,001 mm).
- Mezclar el petróleo, ya en estado nebuloso o de vapor, con el aire.
- Mantener la proporción entre el aire y el petróleo.

La **figura 8.25** esquematiza un quemador para petróleo. Por su parte, la **figura 8.26** muestra un quemador para gas. El gas combustible propicia las mejores condiciones de servicio, después de la energía eléctrica, en lo que toca a la limpieza de las instalaciones; entretanto, tiene como desventaja el peligro de explosión y el costo relativamente alto.

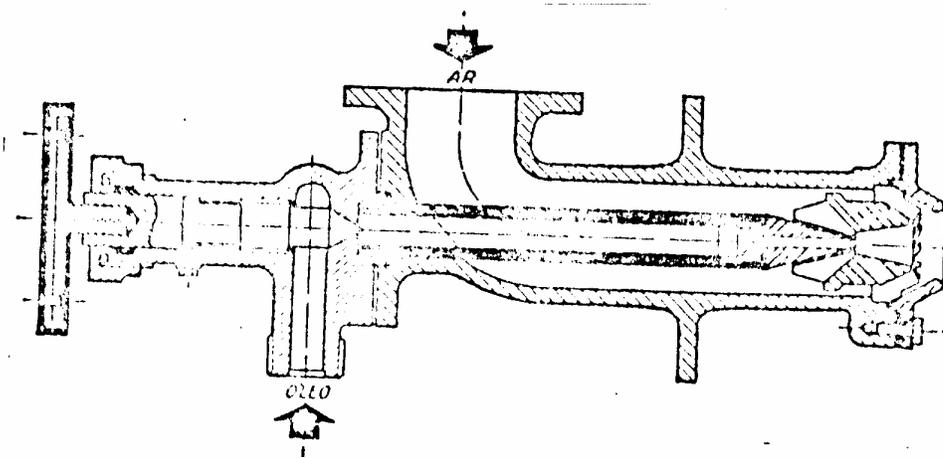


Figura 8.25.: Quemador para petróleo

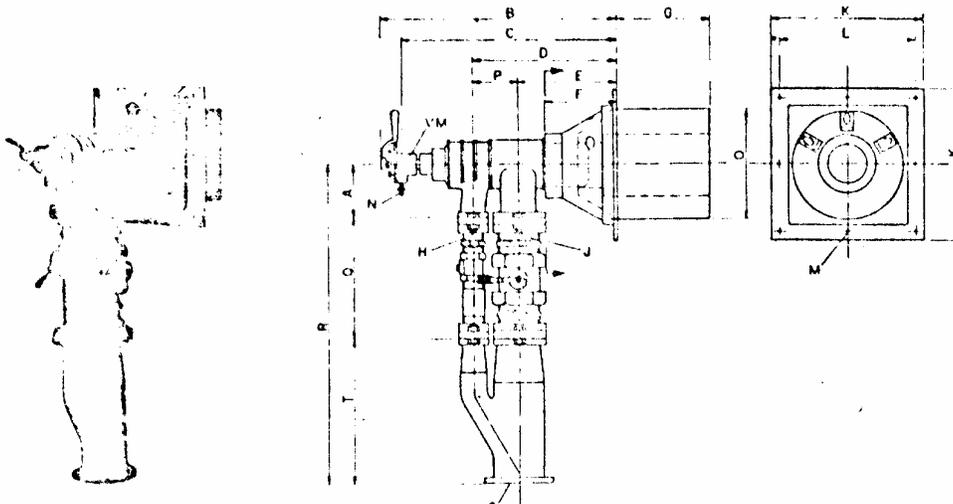


Figura 8.26.: Quemador para gas.

8.7.: Medición de la temperatura

La exactitud con que midan y controlen las temperaturas determinará el éxito de la operación de algunos procesos metalúrgicos, como la fundición, la refinación y el tratamiento térmico. También tendrá un profundo efecto sobre las propiedades de resistencia de muchos metales y aleaciones.

La temperatura de proceso debería controlarse dentro de $\pm 2,5$ °C. Aunque a veces es posible este apretado rango, uno más práctico es de unos ± 5 °C.

Se deben ejecutar tres pasos en todo proceso de control de temperatura. Antes de poder establecer control, primero se debe "sentir" (detectar) la variable mediante algún mecanismo que responda a cambios en la calidad o valor de la variable. Luego, esta cantidad, o su cambio, debe ser indicada o registrada previo a ser controlada. Siguiendo la acción de control, el último paso en la secuencia es la transmisión de la salida del controlador al "elemento final", el cual es un componente del proceso en sí. Los elementos finales envían por medio de un relé la salida del controlador y causan cambios correctivos en el proceso.

Sensores de Temperatura. Como es a menudo el caso, una variable es medida y luego traducida, o convertida, a otra. Por ejemplo, las temperaturas ambientales se miden por la expansión o contracción de una columna de fluido o de un metal. Mediante calibración, estas variables se convierten a lecturas de temperatura numérica.

Estos simples mecanismos, sin embargo, no se adecuan a temperaturas más elevadas. Los sensores utilizados para medir altas temperaturas son los termopares y los pirómetros. Como sea, ambos utilizan el mismo enfoque anterior; esto es, se mide una variable y se la convierte a otra.

8.7a.: Medición de la temperatura por el color.

Uno de los métodos más sencillos para extermiar la temperatura de un metal es mediante la observación del color del cuerpo caliente. Existe una correlación trivial entre la temperatura de un metal y su color, como se ve en la Tabla N° 2. Este método dará sólo estimaciones de temperatura aproximadas, excepto cuando lo aplique un observador experimentado. La principal dificultad es que la apreciación del color varíe con los diferentes materiales.

TABLA 2 : Variación del calor con la temperatura

COLOR	TEMP.,°C
Rojo tenue	500
Rojo oscuro	620
Cereza oscuro	650
Rojo cereza	700
Cereza subido	800
Naranja oscuro	900
Naranja	950
Amarillo	980

Si se necesita una indicación o un registro continuo de la temperatura, los instrumentos que se utilicen pueden ser de dos tipos: **a)** los sistemas mecánicos que funcionan esencialmente por efecto de la expansión de un metal, un líquido, un gas o vapor, y **b)** los sistemas eléctricos que funcionan por medio de la resistencia eléctrica medida, un termopar, la radiación o pirómetros ópticos.

8.7b.: Termómetros por expansión metálica

La mayoría de los metales se expanden cuando se calientan y se contraen cuando se enfrían y la cantidad de expansión dependerá de la temperatura y del coeficiente de expansión de cada metal. Este principio se aplica en la cinta bimetalica que se utiliza en el termostato común. Dicha cinta se forma al unir sobre un costado de una tira de metal con coeficiente de expansión de alto, un metal cuyo coeficiente de expansión sea bajo. Como resultado de pequeños cambios de temperatura, la cinta tomara forma de curva y, por tanto, cerrará o abrirá un circuito eléctrico que controlará el sistema de calefacción de una casa.

Cuando la cinta bimetalica se emplea como indicador industrial de temperatura, generalmente esta enrollada en forma de espiral, uno de cuyos extremos se encuentran fijo, de manera de cuando hay expansión se obtiene automáticamente un movimiento rotatorio en el otro extremo. (**Figura 8.27**)

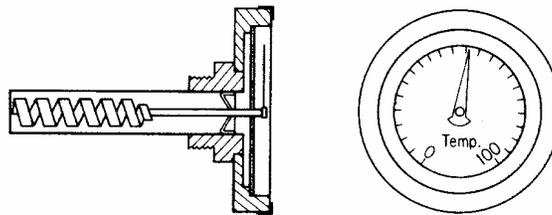


Figura nº 8.27: Indicador de temperatura para uso industrial con un elemento bimetalico helicoidal.

La mayoría de las cintas bimétricas utilizan el metal llamado **Invar** como uno de los elementos, debido a su bajo coeficiente de expansión, y latón amarillo como el otro elemento metálico para temperaturas bajas, o una aleación de níquel para temperaturas altas. Ambos se pueden usar en el intervalo de - 100 a 1000°F, son muy resistente y virtualmente no requieren de mantenimiento. Su principal desventaja es que, debido a que es necesario encerrar el elemento de un tubo protector, la velocidad de respuesta puede ser menor que la de otros instrumentos.

8.7c.: Termómetro de expansión líquida.

El resto del sistema mecánico de los instrumentos para medir la temperatura, ya sea por expansión líquida o por presión de gas o vapor consta de un bulbo expuesto a la temperatura que se va a medir y un dispositivo expansible, generalmente un tubo Bourdon, que hace funcionar una aguja indicadora o una pluma registradora. El bulbo y el tubo Bourdon están conectados con un tubo capilar y se llaman con un elemento adecuado (**Figura 8.28**).

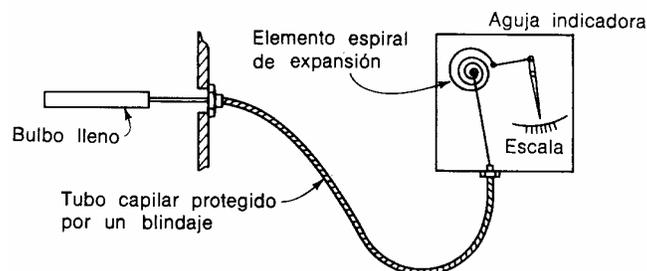


Figura 8.28.: Sistema térmico sencillo para medir la temperatura industrial.

El termómetro por expansión líquida tiene el sistema entero lleno con un líquido orgánico adecuado o con mercurio. Los cambios de la temperatura del bulbo hacen que el líquido se expanda o contraiga, lo cual a su vez hace que el tubo Bourdon también se expanda o contraiga. Los cambios de temperatura a lo largo del tubo capilar y en la caja también producirán alguna expansión y contracción del líquido; por tanto se requiere alguna forma de compensación. La **figura 8.29** muestra un termómetro por expansión líquida totalmente compensado, mediante un sistema idéntico, sin el bulbo, arreglando de manera que los movimientos se sustraigan o anulen. Algunos de los líquidos empleados y las temperaturas a que se utilizan son:

Mercurio	-35a + 950°F
Alcohol	-110a + 160°F
Pentano	+330a + 85°F
Creosota	+20a + 400°F

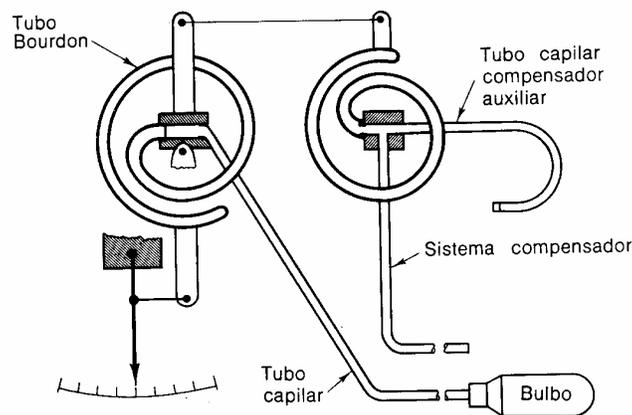


Figura n° 8.29.: Termómetro por expansión líquida totalmente compensado.

8.7d.: Termómetros por presión de gas o vapor.

En el termómetro por presión de vapor, un líquido volátil llena parcialmente el bulbo. Diferentes temperaturas del bulbo producen variaciones de presión correspondientes en el vapor saturado arriba del nivel líquido en el bulbo. Estas variaciones de presión se transmiten al tubo Bourdon, y las indicaciones de presión actúan con una medida de la temperatura en el bulbo. Mediante una adecuada selección de líquido volátil, casi cualquier temperatura de - 60a + 500°F se puede medir. Algunos de los líquidos que más se utilizan son cloruro de metilo, éter alcohol etílico y tolueno.

El termómetro por presión de gas es semejante a lo de presión de vapor, excepto que el sistema se llama con un gas, generalmente nitrógeno. El intervalo de temperatura medido por el termómetro por presión de gas es de - 200 a + 800°F.

Los termómetros con sistema lleno tienen principalmente aplicaciones a baja temperatura, como en los electrodepositación de metales y baños de limpieza, desengrasado, enfriamiento por agua y temperaturas de aceite, y las temperaturas bajo cero en el tratamiento en frío de metales. Estos instrumentos son relativamente baratos, pero no se emplean donde se requiere una reparación rápida o una exactitud excepcional.

8.7e.: Termómetro de resistencia.

El principio del termómetro de resistencia se basa en el incremento de la resistencia eléctrica con el aumento de la temperatura de un conductor. Si se calibran las variaciones de temperatura-resistencia de un metal, es posible determinar la temperatura al medir su resistencia eléctrica. El resistor, con forma de bobina, está montado en el extremo cerrado de un tubo protector y las conexiones se hacen llegar hasta un instrumento adecuado de medición de resistencias, generalmente en un puente de Wheatstone.

Los resistores se hacen generalmente de cobre, níquel o platino. El níquel y el cobre son más apropiados para temperaturas de 150 a 500°F, en tanto que el platino puede emplearse entre - 350 y 1100°F. El termómetro de resistencia es muy exacto y de gran importancia en el laboratorio; sin embargo, su aplicación en la industria es limitada, porque es frágil y requiere de mucho cuidado en su manejo.

8.7f.: Pirómetro termoeléctrico.

Este es el método que más se emplea en trabajos de metalurgia para medir y controlar temperaturas; funcionan en forma satisfactoria hasta 3000°F aproximadamente.

El pirómetro termoeléctrico sencillo, mostrado en la **figura 8.30**, consta de las unidades siguientes:

1. El termopar, compuesto de dos metales o aleaciones diferentes,
2. El bloque de empalmes, situado cerca y fuera del horno,
3. Los cables de extensión, y
4. El instrumento indicador o registro.

El funcionamiento de este pirómetro se basa en dos principios:

Efecto Peltier Si dos alambres metálicos diferentes se ponen en contacto eléctrico, habrá una fem a través de la punta de contacto. La magnitud de la fem desarrollada se determina por la composición química de los alambres y la temperatura de la punta de unión.

Efecto Thomson Si hay una diferencia de temperatura entre los extremos de un alambre homogéneo único, existirá una fem entre los extremos de dicho alambre. La magnitud de la fem desarrollada quedará determinada por la composición, la uniformidad química del alambre y la diferencia de temperatura.

Por tanto, la fem total en un pirómetro termoeléctrico, algunas veces llamada **efecto Seebeck**, es la suma algebraica de cuatro fem: dos fem de Peltier en las uniones caliente y fría y dos fem Thomson a lo largo de cada alambre. La unión fría o unión referencia debe mantenerse a temperatura constante, la cual generalmente **0°C o 32°F**. En el instrumento indicador, esto se hace generalmente por medio de una bobina de compensación de la unión fría que cambia su resistencia con la fluctuación en la temperatura ambiental, manteniendo siempre el instrumento a **32°F**. Si la unión fría o la unión de referencia se mantienen a temperatura constante, entonces la fem mediana en el circuito del pirómetro será una función definida de la temperatura de la unión caliente. Mediante una calibración adecuada, es posible determinar una relación exacta entre fem desarrollada y la temperatura real de la unión caliente. (**tabla 3**). Otra ley termoeléctrica útil establece que si se introduce un tercer metal en el circuito, la fem total del circuito no será afectada si la temperatura de este metal es uniforme sobre toda su longitud.

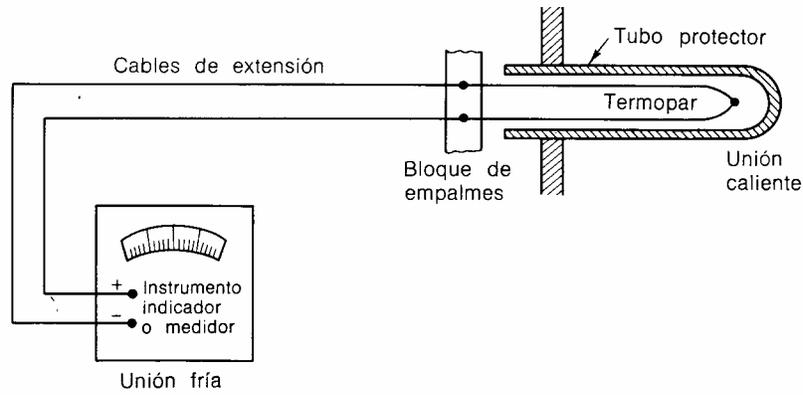


Figura 8.31.: Pirómetro termoelectrico sencillo.

TABLA 3 Temperatura contra fuerza electromotriz* Fem en milivoltios; unión fría 32°F.

TEMP., °F	PT + 10% RH contra platino	cromel contra alumel	Hierro contra constantán	Cobre contra constantán
32	0.0	0.0	0.0	0.0
100	0.221	1.52	1.94	1.517
200	0.595	3.82	4.91	3.967
300	1.017	6.09	7.94	6.647
400	1.474	8.31	11.03	9.525
500	1.956	10.57	14.12	12.575
600	2.458	12.86	17.18	15.773
700	2.977	15.18	20.25	19.100
800	3.506	17.53	23.32	
900	4.046	19.89	26.40	
1000	4.596	22.26	29.52	
1100	5.156	24.63	32.72	
1200	5.726	26.98	36.01	
1300	6.307	29.32	39.43	
1400	6.897	31.65	42.96	
1500	7.498	33.93	46.53	
1600	8.110	36.19	50.05	
1700	8.732	38.43		
1800	9.365	40.62		
1900	10.009	42.78		
2000	10.662	44.91		
2100	11.323	47.00		
2200	11.989	49.05		
2300	12.657	51.05		
2400	13.325	53.01		
2500	13.991	54.92		
2600	14.656			
2700	15.319			
2800	15.979			
2900	16.637			
3000	17.292			

El propósito de los cables de extensión es mover la unión de referencias a un punto donde la temperatura no variará. Los alambres del termopar no suelen ser suficientemente largos ni se hallaran tan aislados como para conectarse en forma directa al instrumento. Los cables de extensión por lo general están hechos del mismo material que los alambres del termopar y se colocan en un cable doble, con la cubierta individual según el código de color para su identificación. En algunos casos, se pueden utilizar cables de extensión de cobre, pero entonces

las uniones frías están en el bloque de empalmes en vez del instrumento de medición; por ende, podría ser más difícil mantenerlas a temperaturas constantes.

8.7g.: Materiales para termopar.

En teoría, dos alambres metálicos distintos desarrollarán un fem cuando hay una diferencia de temperatura entre sus puntos de unión; sin embargo, desde el punto de vista industria, solo unas cuantas combinaciones se utilizan realmente para termopares. Estas se escogieron sobre todo por su potencial termoeléctrico, costo razonable, estabilidad del tamaño de grano, linealidad de la curva temperatura-fem, y puntos de fusión mayores que la temperatura que se va a medir. El primer material en la combinación siempre se conecta a la terminal positiva.

Cromel-alumel El cromel (90% de níquel, 10% de cromo) en oposición al alumel (94% de níquel, 3% de manganeso, 2% de aluminio y 1% de silicio) es una de las combinaciones industriales más ampliamente utilizadas; tiene una curva de calibración bastante lineal y buena resistencia a la oxidación; además, es más útil en el intervalo de 1200 a 2200°F.

Hierro-constantán El constantán es una aleación que contiene 54% de cobre y 46% de níquel, aproximadamente. Esta combinación puede utilizarse en el intervalo de 300 a 1400°F. Las principales ventajas son comparativamente su bajo costo, alta energía termoeléctrica y adaptabilidad a atmósferas diferentes.

Cobre-constantán La aleación de constantán empleada con cobre diferente ligeramente de la utilizada con hierro y podría contener pequeñas cantidades de manganeso y hierro. Esta combinación es más adecuada para mediciones a baja temperaturas, hasta de -420°F. El límite superior es de 600°F, aproximadamente.

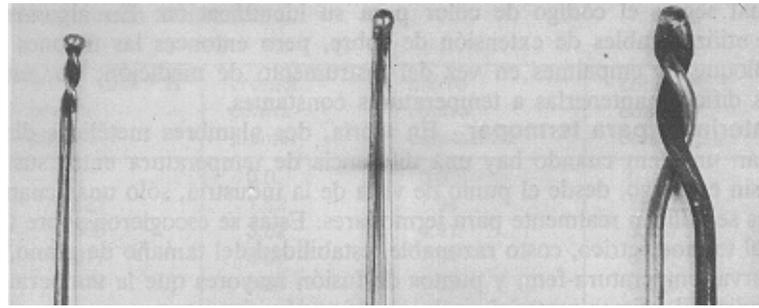
Las combinaciones anteriores se conocen como **termopares basados en metal** (base de metal).

Platino, latino-rodio al 10% Este es un termopar de "metal doble". Se utiliza para medir temperaturas demasiado altas para los termopares de base metal y en casos en que la radiación o los pirómetros ópticos no son satisfactorios, Si se emplea continuamente, es adecuado en el intervalo de 32 a 3000°F, pero se deteriorara rápidamente en una atmósfera reductora.

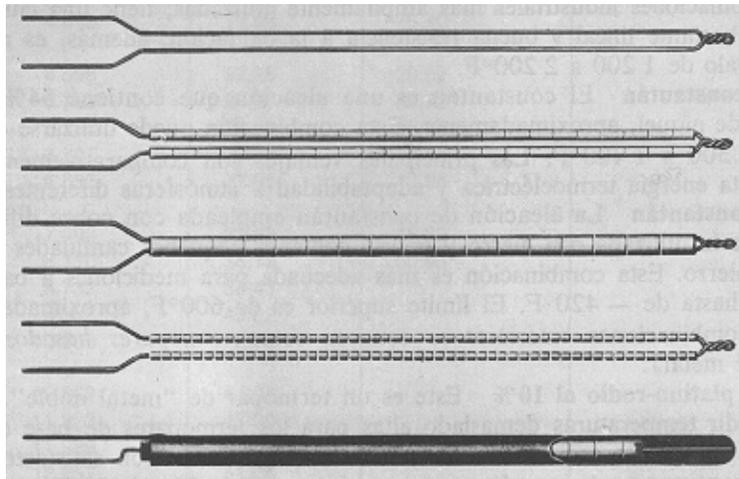
Los termopares se fabrican cortando longitudes adecuadas de los dos alambres; los extremos se tuercen conjuntamente de manera cuidadosa una dos vueltas, o algunas veces se unen por sus extremos, y se sueldan para formar una cabeza redondeada y uniforme (**Figura 8.32a**)

Los alambres del termopar deben estar en contacto eléctrico sólo en la unión caliente, ya que el contacto en cualquier otro punto generalmente resultará en una fem medida demasiado baja. Los dos alambres están aislados entre sí por pequeños cilindros de porcelana o tubos de cerámica (**Figura 8.32b**).

En la mayoría de los casos, los termopares se encuentran en tubos protectores, que pueden ser de cerámica o metálicos. El tubo protege el termopar contra daños mecánicos y previene la contaminación de los materiales del termopar por la atmósfera del horno. Hay disponible una variedad de tubos protectores metálicos, tales como hierro forjado o hierro fundido (hasta 1300°F), e hierro con 14% de cromo (hasta 1500°F), hierro con 28% de cromo o nicromel (hasta 2000°F). Por encima de 2000°F los tubos de protección que se usan son los de porcelana o los de carburo de silicio.



(a)



(b)

Figura 8.32.: a) Ejemplos de termopares adecuadamente soldados. b) Diferentes tipos de separadores de porcelana.

8.7h.: Medición de la fem.

La temperatura de la unión caliente se determina al medir la fem generada en el circuito. Un potenciómetro es uno de los instrumentos más exactos para fem pequeñas.

Básicamente, la fem por un termopar es balanceada contra una fem conocida y medida en términos de este patrón. La escala del alambre cursor puede calibrarse en milivolts o directamente en temperatura. En este último caso, el instrumento se debe emplear solo con el tipo de termopar para el cual esta calibrado. Esta información generalmente se haya impresa en el cuadrante del instrumento.

La **figura 8.33** muestra un circuito sencillo de un potenciómetro de indicación directa. La corriente de la celda seca pasa por un circuito principal, que consta de un alambre cursor de A a B cuya magnitud depende de la corriente que pasa por él desde la celda seca como el alambre cursor tiene resistencia uniforme, hay idénticas caídas de potencial a través de cada división. A fin de estandarizar la caída entre A y B para corresponder a las marcas fijadas en el disco indicador, en el circuito se conecta una celda estándar de voltaje fijo y conocido, moviendo el interruptor a la celda estándar (C.E.). Nótese que la polaridad de la celda estándar es tal que la corriente que fluye de ella se opone a la que fluye de la celda seca. La resistencia R se ajusta de tal modo que estas corrientes tengan igual intensidad, con el resultado neto de que no hay corriente que fluye por el circuito como lo indica la no deflexión del galvanómetro. Así, el circuito está estandarizado de modo que la caída de potencial a través de cada división del alambre cursor corresponde a una cantidad definida de milivolts.

Cuando se mide la fem del termopar, se reemplaza la celda estándar en el circuito moviendo el interruptor a la posición termopar (P.T.). El termopar se debe conectar adecuadamente de modo que la corriente que fluye de ahí se oponga al flujo de corriente de la celda seca. El circuito se balancea no por ajuste de la resistencia R , sino por ajuste de la resistencia de la posición del alambre cursor contenida en el circuito del termopar. Para hacer este ajuste, se gira el disco indicador hasta que la lectura del galvanómetro sea cero. En este momento, la caída del potencial a través del alambre cursor hasta el punto de contacto es igual a la fem del termopar y en la escala del alambre cursor se pueden leer directamente milivolts. Una vez que se consulta una tabla de calibración adecuada, como la **tabla 3**, para el termopar en uso se puede hacer la conversión de milivolts a temperatura, o leer directamente en temperatura si el disco es calibrado de esa manera.

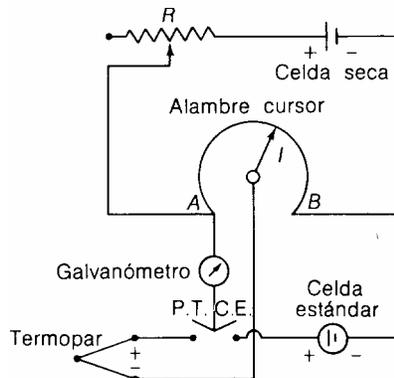


Figura 8.33.: Circuito sencillo de un potenciómetro de indicación directa.

Como la temperatura de la unión fría en el instrumento suele ser mayor que la temperatura de la unión fría estándar (32°F), es necesario compensar esta variación. La compensación puede hacerse manual o automáticamente por medio de un resistor sensible a la temperatura, llamado **compensador de unión fría**. En contraste con la mayoría de los materiales, el compensador de unión fría tiene un coeficiente de temperatura para la resistencia negativo. Esto significa que su resistencia disminuye con el aumento de temperatura. De esta manera, mantendrá la unión fría a una temperatura constante al balancear cualquier cambio en resistencia conforme la temperatura del instrumento varíe.

8.7i.: Pirómetro de registro y de Control.

En la mayoría de las instalaciones industriales, es necesario que el pirómetro efectúe algo más que simplemente indicar temperatura. La aguja del potenciómetro se puede sustituir por una pluma que se mueve sobre una carta corrediza, a fin de obtener un registro completo de la temperatura. Este recibe el nombre de **pirómetro de registro**. También el instrumento mediante circuitos eléctricos se puede utilizar para controlar el flujo de gas a los quemadores o de electricidad a los elementos de calefacción y de ese modo mantener constante una temperatura predeterminada para el horno. Esto se llama **pirómetro de control**. Es posible preparar el instrumento para registrar y controlar la temperatura de uno o más termopares.

1 Pirómetro de radiación. Los principios del funcionamiento del pirómetro de radiación incluyen una fuente de radiación estándar, conocida como **cuerpo negro**, el cual es un cuerpo hipotético que absorbe toda la radiación que incide sobre él. Tal cuerpo radia energía con mayor rapidez que cualquier otro cuerpo a la misma temperatura. Los pirómetros de radiación generalmente están calibrados para indicar temperaturas de cuerpo

negro o reales. La ley de Stefan-Boltzmann, que es la base para la escala de temperatura de los pirómetros de radiación, muestra que la rapidez de energía radiante que despiden un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta

$$W = KT^4$$

donde

W = rapidez de emisión de la energía de un cuerpo negro

K = constante de proporcionalidad

T = temperatura absoluta del cuerpo negro

La temperatura aparente medida en los materiales que no sean en cuerpo negro será siempre menor que la temperatura real. Esto se deberá a la emisividad del material, la cual se define como la razón de la rapidez de emisión de energía radiante del material que no es un cuerpo negro a la razón de emisión de un cuerpo negro a la misma temperatura. Así

$$W = KeT^4 = KT_a^4$$

o bien

$$T_a^4 = e_t T^4$$

donde

T_a = temperatura absoluta aparente del cuerpo no negro medida con un pirómetro

e_t = emisividad total del cuerpo no negro

Por tanto, una vez conocida la emisividad total del material, la temperatura indicada por el pirómetro se puede corregir fácilmente a la temperatura real absoluta, misma que leerá el pirómetro bajo condiciones de cuerpo negro.

La **figura 8.34** muestra una sección transversal de un pirómetro de radiación tipo espejo. La radiación del objetivo pasa a través de la ventana A al espejo B y es enfocada para formar una imagen del objetivo en el plano del diagrama interno J. Esta imagen es enfocada luego por el espejo D sobre un grupo de termopares, llamado **termopila E**. Observando el agujero C a través de la lente H se puede determinar si la imagen del objetivo es suficientemente grande para cubrir el agujero y si el pirómetro está apuntado en forma adecuada. El aumento de temperatura de la termopila es aproximadamente proporcional a la rapidez con que la energía radiante incide en ella; por tanto, la fem es proporcional a T^4 ; sin embargo, en la práctica no toda la energía radiante alcanza al termopar, ya que alguna la absorberán la atmósfera y las partes ópticas del instrumento. De esta manera, la ley de Stefan-Boltzmann no se satisface totalmente y la relación entre la temperatura de la fuente de radiación y la fem del termopar puede expresarse en forma empírica como

$$E = KT^b$$

Las constantes K y b deben determinarse experimentalmente por calibración en dos puntas de estandarización.

El pirómetro de radiación no necesita estar en contacto directo con el cuerpo caliente; de esta manera, el límite superior del intervalo de temperatura no está determinado por la habilidad del pirómetro en sí para resistir altas temperaturas. Con el uso de protecciones apropiadas en el sistema óptico, no hay límite superior de temperatura. El límite mínimo de temperatura es de 1000°F aproximadamente.

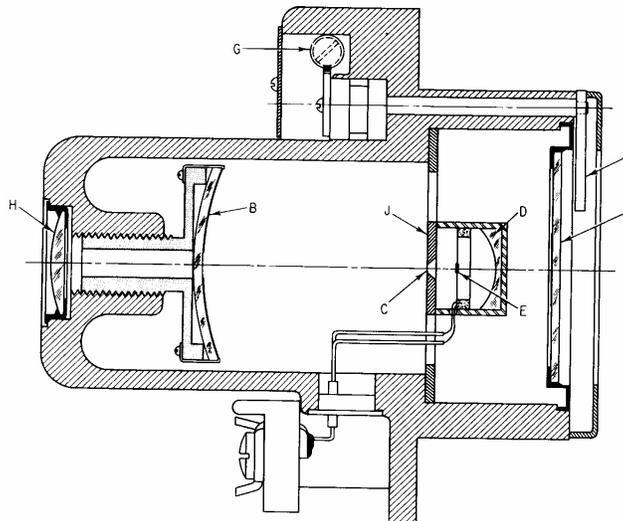


Figura 8.34.: Pirómetro de radiación tipo espejo

2 Pirómetro óptico. El instrumento descrito en la sección precedente que respondió a todas las longitudes de onda de radiación se conoce como pirómetro de radiación total. Aunque los principios generales sobre los que se basa el pirómetro óptico son los mismos que para el pirómetro de radiación, difieren en que el pirómetro utiliza una sola longitud de onda o una banda angosta de longitudes de onda correspondiente a la parte visible del espectro. El pirómetro óptico mide la temperatura comparando el brillo de la luz emitida por la fuente con la de una fuente estándar. Para facilitar la comparación de color, se utiliza un filtro para color rojo que restringe la radiación visible a la longitud de onda de la radiación roja. El tipo que más se utiliza en la industria es el de **filamento que desaparece**. Este pirómetro consta de dos partes: el telescopio y una caja de control. El telescopio (**figura 8.35**) contiene un filtro para color rojo montado en vidrio enfrente del ocular y una lámpara con un filamento calibrado, sobre cual la lente objetivo enfoca una imagen del cuerpo cuya temperatura se va a medir. También contiene un interruptor para cerrar el circuito eléctrico de la lámpara y una pantalla de absorción para cambiar el intervalo del pirómetro.

Como se muestra en la **figura 8.35b**, la caja de control contiene las partes principales del circuito de medición, las cuales incluyen celdas secas que proporcionan la corriente para iluminar la lámpara, un reóstato R para ajustar la corriente del filamento, y un alambre cursor del potenciómetro con su correspondiente celda estándar y un galvanómetro para medir de manera precisa la corriente del filamento. Esta corriente se ajusta en forma manual, dando vuelta a R, hasta que el filamento adquiere un brillo igual al de la imagen del objeto observado y hasta que el filamento parece desaparecer (**Figura 8.35c**) Luego se obtiene un balance exacto al dar vuelta a P_1 hasta que la lectura del galvanómetro sea cero. Una escala acoplada al contacto del potenciómetro P indica la temperatura directamente.

El intervalo de temperatura del pirómetro óptico descrito es de 1400 a 2400°F. Este límite superior se debe tanto al peligro de deterioro del filamento a temperaturas mayores, como al efecto deslumbrador sobre el ojo humano del brillo a temperaturas elevadas. El intervalo de temperaturas puede extenderse a valores mayores mediante una pantalla de absorción entre el lente objetivo y el filamento, permitiendo así que los brillos puedan igualarse a menores temperaturas del filamento.

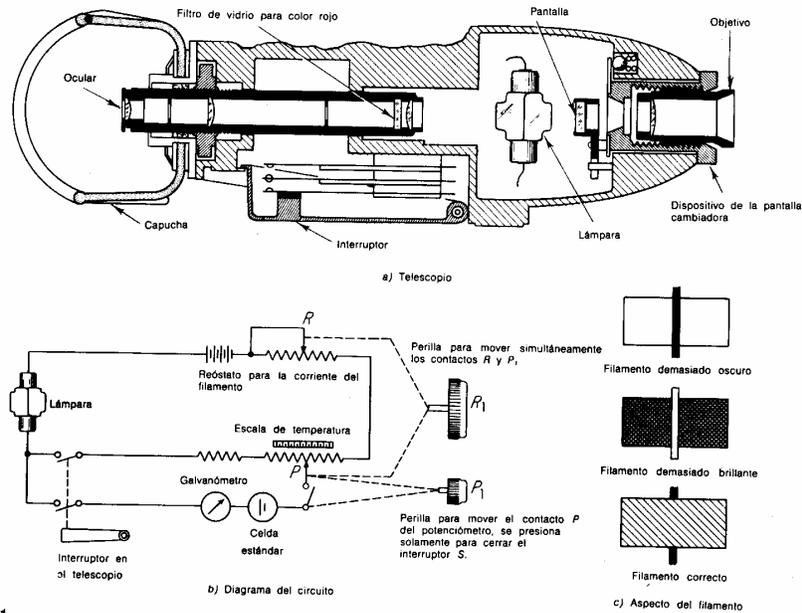


Figura 8.35.: Pirómetro óptico tipo de filamento que desaparece: a) Telescopio; b) diagrama del circuito; c) aspecto del filamento.

Entonces, el pirómetro puede calibrarse para el intervalo de mayor temperatura usando las menores temperaturas del filamento. De este modo, mediante diversas pantallas de absorción, el límite superior del pirómetro óptico puede extenderse hasta 10000°F o más.

Algunas ventajas de los pirómetros ópticos y de radiación son:

1. Medición de temperaturas altas,
2. Medición de cuerpos inaccesibles,
3. Medición de cuerpos en movimiento o pequeños.
4. Ninguna parte del instrumento está expuesta a los efectos destructivos del calentamiento.

Las principales desventajas son:

1. Errores cometidos porque la igualación fotométrica es cuestión de criterio,
2. Errores introducidos por humo o gases existentes entre el observador y la fuente,
3. Incertidumbre respecto al grado de diferencia o alejamiento de las condiciones del cuerpo negro.