

aplicaciones de cementación gaseosa, la adición de un hidrocarburo gaseoso en el horno incrementará el potencial de carbono del gas, lo que permitirá generar un gas portador más neutro en el generador.

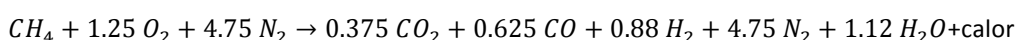
Atmósferas exotérmicas

A3- 29

En ocasiones, la cementación se lleva a cabo utilizando un gas exotérmico desecado y purificado, que se obtiene a partir de la combustión parcial de hidrocarburos gaseosos con $\alpha=0.45$ a 0.60 , con adición del 12% al 15% de gas natural. Sin embargo, debe tenerse precaución, puesto que cuando el contenido en gas natural supera el 18-20%, en el horno se forma gran cantidad de hollín.

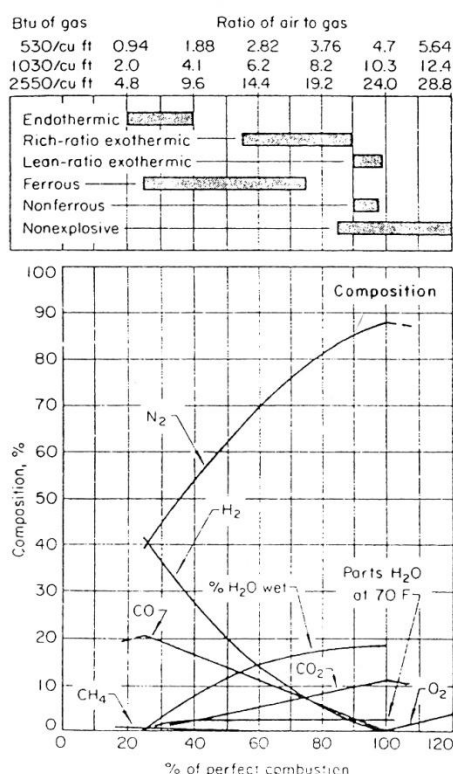
Como se ha indicado, la combustión de la mezcla aire/hidrocarburo se lleva a cabo en un generador de gas que permite controlar las relaciones gas-aire, alcanzando así la composición requerida del gas. La parte no quemada del hidrocarburo es craqueada para obtener CO y H_2 a partir del calor generado durante la combustión. El calor que corresponde a esta reacción da nombre a este gas, puesto que es una reacción exotérmica. Por otra parte, la fracción que se quema en la mezcla gas-aire produce CO_2 y H_2O .

En este proceso, la reacción teórica simplificada del metano con el aire es la siguiente:



De forma que 1 volumen de combustible y 6 volúmenes de aire proporcionan 6.63 volúmenes de mezcla gaseosa, considerando que se ha eliminado la práctica totalidad de agua. En la práctica, los generadores de gas exotérmico suelen operar con un ratio de aire-gas inferior a la relación 6.6-1, para de este modo prevenir la formación de hollín resultado de una reacción incompleta. También se encuentran trazas de metano no reaccionado en el gas producido.

En la Figura A3-7 puede observarse la relación que existe entre los diferentes constituyentes de la atmósfera en función de la relación aire/gas: por ejemplo, para un 60% de combustión, la composición del gas será 6% CO_2 , 14% H_2 , 11% CO y 0.84% CH_4 .



A3- 30

Figura A3- 14: Relación entre constituyentes en atmósferas de generación para varios ratios aire-gas.

Para reducir el contenido de agua en el gas, este se hace pasar desde la cámara de reacción a través de condensadores refrigerados. La temperatura alcanzada por estos refrigeradores condicionará el contenido en agua del gas. En aquellos casos en que es necesario reducir en mayor medida la presencia de agua, esto se consigue a partir de la congelación indirecta del gas.

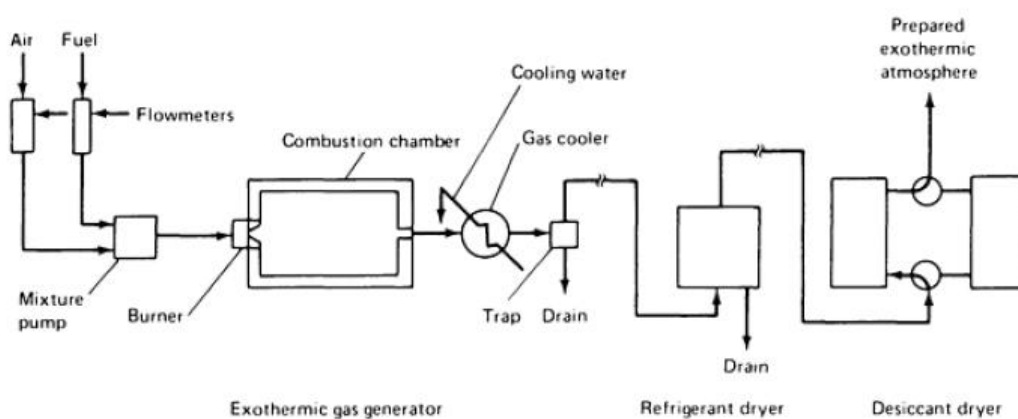


Figura A3- 15: Diagrama de flujo de un sistema de generador exotérmico. (2)

Si bien son el gas natural y el propano los hidrocarburos más habituales para la generación de atmósferas exotérmicas, los equipos actuales permiten que pueda utilizarse cualquier hidrocarburo como combustible.

Los generadores exotérmicos son generadores de gas inerte. Son dispositivos en los que se produce la combustión de una mezcla gaseosa, la cual proporciona la atmósfera inerte deseada a partir del control de la relación aire-gas de operación. Propano y gas natural son los combustibles más utilizados, si bien también pueden utilizarse otros hidrocarburos gaseosos o líquidos.

A3- 31



Figura A3- 16: Equipo de generación de atmósfera exotérmica. (7)

Los generadores exotérmicos controlan la ignición de una mezcla medida y controlada de aire y combustible, quemando la mezcla a temperaturas que se sitúan entre 1100°C y 1500°C.

Tenemos dos grupos principales de atmósferas exotérmicas:

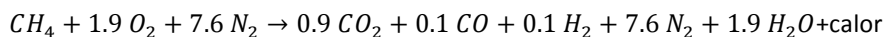
- Exotérmica *ligera*, formada fundamentalmente por nitrógeno y CO_2 (con muy poco contenido en hidrógeno).
- Exotérmica *rica*, con contenidos más bajos de nitrógeno y CO_2 , y mayor presencia de hidrógeno.

Los generadores de gas exotérmicos pueden generar ambos tipos de atmósfera cambiando los ratios aire-combustible: la atmósfera ligera se obtiene a partir de una relación más alta en aire, mientras que la atmósfera rica se obtiene utilizando una relación más alta en combustible.

El primer tipo de atmósfera es adecuado para el tratamiento de metales no férreos. Las atmósferas exotérmicas ligeras generalmente tienen una aplicación muy reducida en la mayoría de tratamientos térmicos de materiales férricos, excepto cuando se utilizan como agentes oxidantes o para operar a bajas temperaturas.

La producción de *gas exotérmico ligero* tiene lugar a partir de la combustión del hidrocarburo combustible con una relación aire-hidrocarburo muy controlada. La mezcla aire-combustible es quemada en una cámara de combustión durante el tiempo suficiente para permitir que la reacción

alcance el equilibrio. El gas resultante es enfriado para condensar parcialmente el vapor de agua formado durante la combustión y para facilitar su transporte y control. En este proceso, la reacción teórica simplificada del metano con el aire es la siguiente:



En la práctica, los generadores de gas exotérmicos son operados con relaciones aire-gas más altas de las requeridas, para así producir un mínimo del 1% de CO e H_2 , evitando cantidades no deseadas de oxígeno residual.

A3- 32

Composición del gas exotérmico	Ligero	Rico
CO	0.5 a 1.5%	11 a 12%
CO ₂	11 a 13%	5 a 6%
H ₂	0.5 a 2%	12 a 13%
N ₂	balance	
CH ₄	trazas	

Figura A3- 17: Composición del gas producido en generadores exotérmicos.

En aplicaciones de tratamiento térmico de aceros se busca obtener una atmósfera rica, para lo cual se utiliza un catalizador que asegura que la craquización de las moléculas gaseosas producto de la combustión sea completa. El gas resultante del proceso es una mezcla consistente en hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, agua y nitrógeno. Cuando el proceso de combustión se ha completado, el gas (exento de oxígeno) es enfriado y generalmente enviado a la instalación de tratamiento térmico. Cuando la aplicación requiere de un punto de rocío más bajo, suelen introducirse equipos refrigerantes y desecantes.

Algunos aspectos técnicos a destacar relativos a las atmósferas exotérmicas son los siguientes:

- Las atmósferas exotérmicas son más económicas que las endotérmicas, pudiéndose además aplicar tanto a materiales férreos como no férreos.
- Mediante el control de la relación aire/gas, también pueden ser utilizadas para la purga del horno (*ligeros*), procediendo posteriormente al reajuste de los requerimientos del proceso deseado.
- Son fuertemente descarburantes, y si el control de la atmósfera no es el correcto, pueden conducir a la formación de hollín en la cámara de trabajo.
- Como se ha indicado, pueden ser *ricas* o *ligeras* (ver Figura A3-7), de acuerdo con el ratio de combustión que se aplique.

A3.3.2. ATMÓSFERAS SINTÉTICA BASADAS EN NITRÓGENO

Como alternativa a estas atmósferas de generación, encontramos las mezclas sintéticas nitrógeno-metanol. La atmósfera endotérmica presenta una serie de desventajas: es costosa, explosiva, tóxica y provoca oxidación interna o intergranular. Estos y otros factores hicieron que se desarrollasen procedimientos alternativos basados en atmósferas sintéticas a base de nitrógeno, para cuya preparación no se requiere generador.

En la práctica, las atmósferas industriales basadas en nitrógeno han encontrado una gran aceptación en la mayoría de las aplicaciones metalúrgicas, siendo predominantes en la mayoría de operaciones de tratamiento térmico habituales.

Los componentes de la atmósfera, nitrógeno ($\geq 80\%$), metano o metanol y CO_2 , después de mezclados, son introducidos directamente en el horno de cementación. En el horno transcurre la reacción de interacción del metano con el CO_2 , formándose una atmósfera constituida por N_2 ($\sim 85\%$), H_2 (10 a 12%), CO (2 a 4%), CO_2 (0.02 a 0.04%) y CH_4 (3 a 5%).

El gas portador nitrogenado no requiere generadores especiales y es más seguro por contener menos componentes combustibles (15 a 20% en lugar del 65% que contiene el gas endotérmico).

Asimismo, durante las reacciones que transcurren en el horno, el volumen de gas de la atmósfera se incrementa, por lo que se reduce el consumo del gas portador en comparación con el consumo del gas endotérmico.

Como ejemplo de procesos sin generador que utilizan estas atmósferas sintéticas, puede citarse el proceso Linde- CARBOTHAN® (8) : este procedimiento se basa en el suministro de nitrógeno puro y vapores de metanol en el espacio útil del horno. La atmósfera que se forma tiene una composición semejante a la del gas endotérmico. El sistema CARBOTHAN® permite obtener la atmósfera necesaria directamente en el horno con la ayuda de nitrógeno puro y metanol, líquido que a una temperatura determinada se vaporiza y genera monóxido de carbono e hidrógeno.

Las ventajas principales de este procedimiento frente a las atmósferas de generación son:

- alto rendimiento
- facilidad de control
- purga rápida y segura con nitrógeno
- menor tasa de rechazo en piezas procesadas
- bajo consumo de gas
- disminución del consumo en el servicio

Los sistemas comerciales de atmósferas basadas en nitrógeno empleados en aplicaciones metalúrgicas y en la industria del tratamiento térmico utilizan gases y equipamientos que son comunes y habituales en otras muchas aplicaciones. En muchos casos, el componente principal de la atmósfera es nitrógeno gas de calidad industrial, que es suministrado al horno a partir de una instalación que consiste básicamente en un tanque de almacenamiento, un evaporador y una estación de control de presión y caudal.

El nitrógeno sirve además como elemento puro, seco e inerte que proporciona un procedimiento eficaz para la purga y blanqueo de instalaciones de tratamiento térmico.

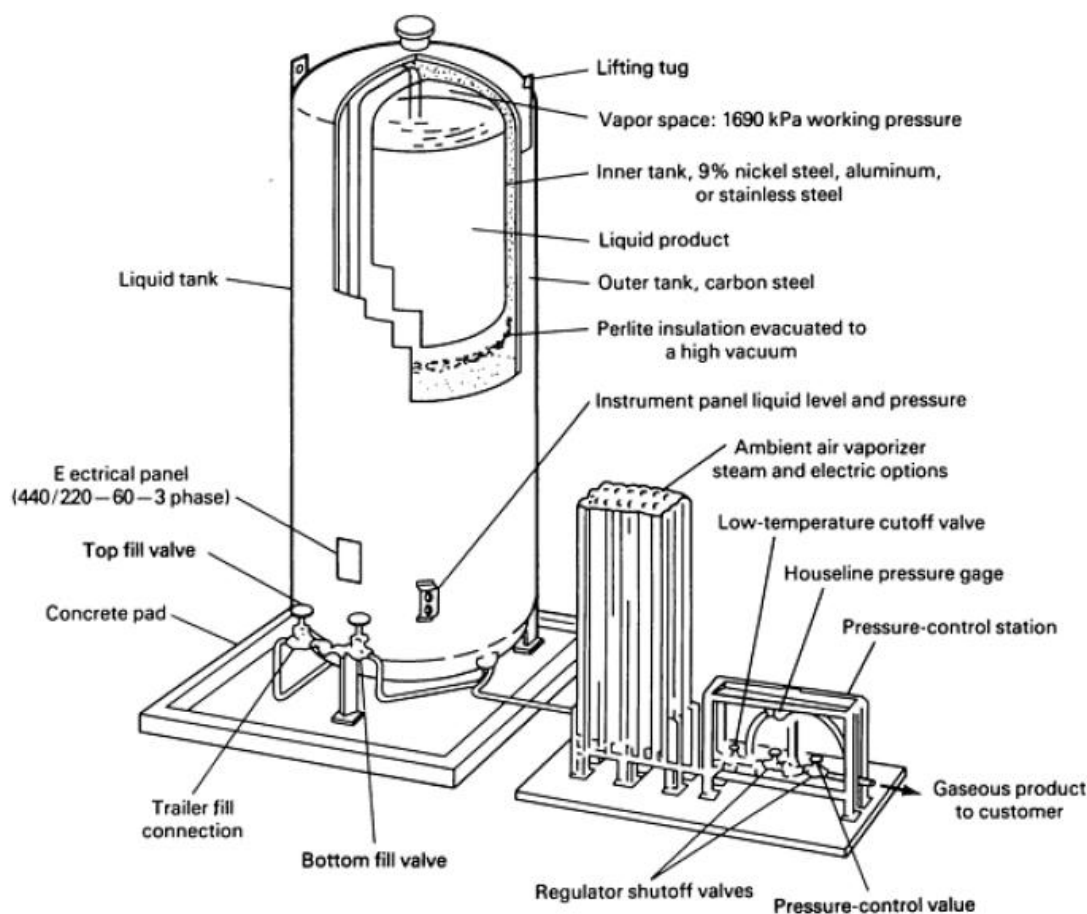


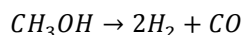
Figura A3- 18: Instalación típica de almacenaje de nitrógeno líquido. (2)

En la mayoría de las aplicaciones, el nitrógeno es el componente predominante, resultando entre el 50 y el 100% de la atmósfera. No obstante, el gas de enriquecimiento habitualmente es el hidrógeno, si bien para determinadas aplicaciones puede requerirse metano, propano o metanol líquido.

El hidrógeno es utilizado como gas reactivo reductor en muchas atmósferas para aplicaciones de tratamiento térmico: en los sistemas de atmósfera sintética el hidrógeno es a menudo mezclado en forma de gas con nitrógeno para formar atmósferas con composición 90% nitrógeno y 10% hidrógeno.

El hidrógeno líquido normalmente se almacena en tanques desde los que se vaporiza para obtener el gas y posteriormente se distribuye hacia la instalación de tratamiento térmico.

Por otra parte, en aplicaciones en las que se requiere una atmósfera reactiva y con potenciales de carbono controlado, en los sistemas comerciales de atmósferas basadas en nitrógeno generalmente se utiliza metanol como fuente de hidrógeno y monóxido de carbono. En estos casos, el metanol es suministrado al horno en forma de líquido o como vapor. Cuando el metanol es expuesto a temperaturas mayores de 760°C se disocia según la siguiente reacción:



Desde el punto de vista de la instalación, los componentes básicos que se utilizan en un sistema gaseoso industrial están representados en la Figura A3-12: el esquema (a) muestra un sistema de atmósfera de protección basado en nitrógeno-hidrógeno, utilizado a menudo en procesos como el recocido; por otra parte, el esquema (b) muestra un sistema típico nitrógeno-metanol utilizado en aplicaciones de cementación. En todos los casos encontramos tres elementos de instalación fundamentales: los contenedores de almacenaje que contienen los componentes básicos de la atmósfera, el panel de control de mezcla y la instalación de distribución compatible con el diseño del horno.

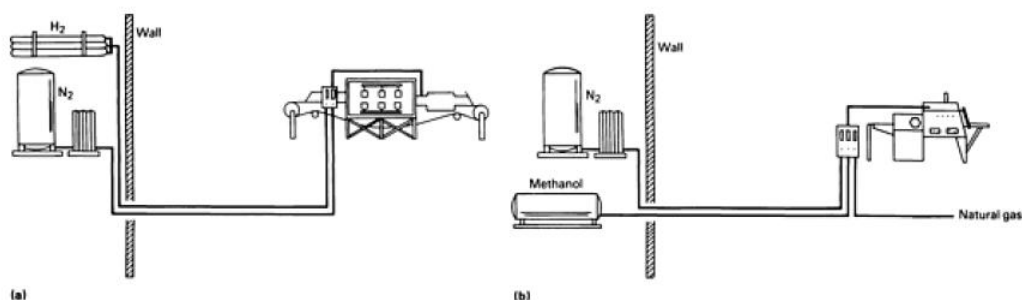


Figura A3- 19: Procesos industriales para atmósferas basadas en nitrógeno. (2)

Los diversos tipos de atmósferas sintéticas comerciales basadas en nitrógeno suelen clasificarse en tres categorías, según la función de la atmósfera: protección, reactividad y control de carbono.

Atmósferas protectoras

Los sistemas de atmósfera requeridos para estas aplicaciones deben prevenir la oxidación o la descarburación de la superficie del metal durante el tratamiento térmico. Generalmente, estas reacciones no deseadas suelen ocurrir debido a la presencia de oxígeno residual o vapor de agua en la atmósfera del horno, resultado de una fuga de aire o una operación de purga inadecuada.

Las aplicaciones típicas incluyen el tratamiento de recocido, tanto de metales férricos como no férricos. El sistema de atmósfera empleado puede ser nitrógeno puro o nitrógeno mezclado con pequeñas cantidades (<5%) de un gas reactivo como hidrógeno, metano, propano o metanol líquido.

Atmósferas reactivas

En estos casos, el contenido en gas reactivo que se requiere en la atmósfera es >5%, utilizándose para reducir óxidos metálicos o para transferir pequeñas cantidades de carbono al material férrico. Los gases reactivos en estos casos suelen ser hidrógeno y monóxido de carbono, y las concentraciones de trabajo dependen de factores como la cantidad de óxidos a eliminar y de los productos de la reacción, vapor de agua y dióxido de carbono que se forman en la atmósfera del horno. Aplicaciones típicas son soldadura, sinterizado de polvo metálico y procesos de reducción de pulvimetalurgia.

Atmósferas de carbono controlado

La principal función de estos sistemas de atmósfera basadas en nitrógeno es la de reaccionar con el acero de una forma controlada, de forma que cantidades significativas de carbono sean absorbidas o retiradas desde la superficie del acero. Por tanto, en estos procesos de tratamiento térmico tienen lugar cambios químicos significativos en la superficie del acero.

Estos sistemas de atmósfera se caracterizan por las altas concentraciones de elementos y gases reactivos en una atmósfera base de nitrógeno, así como por el requerimiento de que la velocidad y cantidad de carbono transferido a la superficie del acero debe ser controlado a partir de la composición de la atmósfera. Los componentes presentes típicamente en la atmósfera son: 10-50% H₂, 5-20% CO y trazas (<3%) de CO₂ y H₂O. Las aplicaciones más habituales de estas atmósferas incluyen los tratamientos de cementación y carbonitruración de piezas mecanizadas, temple neutro, recocidos, sinterización en pulvimetalurgia y restauración de carbono en materiales forjados y trabajados en caliente.

En la tabla siguiente puede encontrarse una comparativa para las aplicaciones de tratamiento térmico que suelen utilizar actualmente sistemas de atmósfera sintética basadas en nitrógeno. Para cada aplicación, los componentes principales de la atmósfera de generación utilizada corrientemente son comparados con el correspondiente sistema alternativo de atmósfera sintética.

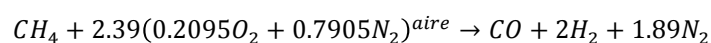
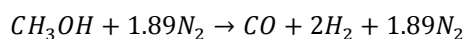
Type atmosphere	of Application	Generated atmosphere				Nitrogen-based atmosphere			
		Designation	Nominal composition, %			Designation	Nominal composition, %		
			N ₂	H ₂	CO		N ₂	H ₂	CO CH ₄
Protective	Annealing	Exothermic	70-100	0-16	0-11	Nitrogen-hydrogen	90-100	0-10	
						Nitrogen-methanol	91-100	0-6	0-3 ...
		Dissociated ammonia	25	75	...	Nitrogen-hydrogen	60-90	10-40	
Reactive	Brazing	Exothermic	70-80	10-16	8-11	Nitrogen-hydrogen	95	5	
		Dissociated ammonia	25	75	...				
	Sintering	Endothermic	40	40	20	Nitrogen-hydrogen	95	5	
		Dissociated ammonia	25	75	...	Nitrogen-methanol	85	10	5 ...
Carbon controlled	Hardening	Endothermic	40	40	20	Nitrogen-methane	97	1	1 1
	Carburizing	Endothermic	40	40	20	Nitrogen-methanol	40	40	20 ...
	Decarburizing	Exothermic	85	5	3	Nitrogen-	90	10	

Figura A3- 20: Comparación de atmósferas generadas respecto a sistemas comerciales base nitrógeno. (2)

Atmósferas nitrógeno-metanol

La generación de un gas portador a partir de una mezcla de nitrógeno y metanol es uno de los procedimientos más extendidos. Una de las ventajas más significativas de este método es que no requiere de un generador de gas endotérmico externo, mientras que como desventaja encontramos los costes de operación generalmente más altos que en el caso anterior.

En este caso, cuando el metanol entra en el horno se craquea para formar CO y H₂. La relación nitrógeno-metanol se suele ajustar de forma que el ratio nitrógeno-oxígeno sea el mismo que para el aire:



Las reacciones anteriores muestran que cuando la relación molar nitrógeno-metanol es de 1.89, la relación de átomos de oxígeno, hidrógeno, carbono y nitrógeno será la misma que la que se obtiene a partir de la relación molar 2.39 para el aire-metano.

Se requiere calor para vaporizar el metanol y la reacción de cracking del metanol para obtener CO e hidrógeno es ligeramente endotérmica. Por tanto, la reacción de descomposición se ve favorecida por las elevadas temperaturas del horno y el uso de ratios bajos de gas de transporte. La presencia de un menor contenido de CO que el estequiométrico en la atmósfera del horno es un síntoma que indica una reacción de cracking incompleta.

La utilización de nitrógeno de elevada pureza (alrededor de 10 ppm de CO₂ y vapor de agua) a partir de la licuefacción del aire es habitual para estos procesos. No obstante, no es un requerimiento ineludible. También puede utilizarse nitrógeno de una pureza inferior, más económica, de forma satisfactoria. No obstante, el contenido de oxígeno en el nitrógeno debe mantenerse relativamente constante para evitar alteraciones en la atmósfera durante el tratamiento térmico.

A3.3.3. VENTAJAS DE LOS SISTEMAS DE ATMÓSFERA SINTÉTICA BASADA EN NITRÓGENO

Los sistemas de atmósfera basados en nitrógeno constituyen alternativas a los sistemas basados en generadores en la mayor parte de las aplicaciones de tratamiento térmico. Si bien ambas tecnologías pueden proporcionar resultados finales similares, existen diferencias significativas a nivel de equipamiento, operación y funcionamiento de estos sistemas que deben tenerse en consideración antes de seleccionar el tipo de tecnología a implementar.

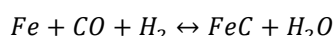
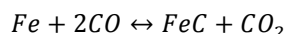
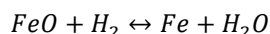
Los sistemas basados en generadores proporcionan una atmósfera de composición fija, la cual está determinada por el ratio aire-hidrocarburo en la entrada del sistema, el equipamiento de lavado y purificación del generador, y en general estado y condición del equipo y el catalizador.

Por otra parte, los sistemas de atmósferas sintéticas base nitrógeno generalmente se inician a partir de los componentes elementales almacenados en contenedores separados, posteriormente son mezclados de acuerdo a las condiciones de atmósfera deseada e introducidos directamente en el horno. La composición resultante de la atmósfera puede variar en el tiempo durante el ciclo de tratamiento térmico e incluso en función de la posición dentro del horno.

La mayoría de los componentes de la atmósfera sintética son producidos bien a partir de procesos criogénicos o bien mediante operaciones de refinado químico. Como resultado, los niveles de impurezas que se obtienen son muy bajos, por ejemplo, inferiores a 20 ppm de impurezas totales para

el nitrógeno líquido. Posteriormente, las atmósferas resultantes presentan a menudo puntos de rocío inferiores a -60°C y niveles de oxígeno y dióxido de carbono inferiores a 10 ppm.

Como se indicó anteriormente, el potencial reductor o carburante de una atmósfera está determinado por varias reacciones químicas y sus respectivas constantes de equilibrio:



Puesto que las mezclas sintéticas basadas en nitrógeno reducen significativamente el contenido en vapor de agua y CO₂ en la atmósfera del horno, puede reducirse la concentración de gases reactivos manteniendo unos potenciales termodinámicos aceptables en las reacciones anteriores.

Por otra parte, y dado que están disponibles los componentes elementales de la atmósfera, esto permite una gran versatilidad en algunas operaciones de tratamiento térmico: por ejemplo, en el inicio del proceso, la introducción de nitrógeno puro para purgar el oxígeno de la atmósfera del horno y de la superficie de los componentes; durante el tratamiento térmico, puede introducirse una mezcla muy reactiva para reducir los óxidos presentes en la superficie de las piezas y obtener un acabado brillante, posteriormente, durante el enfriamiento se introduce una atmósfera protectora menos reactiva, y finalmente una purga con nitrógeno puro para eliminar cualquier traza de combustible antes de abrir el horno.

En otras aplicaciones, como por ejemplo procesos de sinterizado en hornos continuos de tres cámaras, puede utilizarse una cortina o pantalla de nitrógeno puro para purgar la atmósfera en la entrada y salida del horno, reduciendo así la infiltración de aire. En la zona de pre-sinterizado puede suministrarse una atmósfera reductora a partir de una mezcla con ratio controlado de H₂ y H₂O. El control de la temperatura de rocío proporciona suficiente vapor de agua para efectuar una rotura molecular y eliminación eficiente de los lubricantes vaporizados desde la mezcla compactada de polvos metálicos. En la cámara de sinterización puede introducirse una mezcla de nitrógeno-hidrógeno-monóxido de carbono para proporcionar una atmósfera altamente reductora con el potencial de carbono necesario para obtener la resistencia de sinterizado y composición requerida. Finalmente, en la cámara de enfriamiento, puede requerirse únicamente la introducción de nitrógeno como atmósfera protectora, de forma que se obtienen componentes a temperatura ambiente limpios y exentos de óxidos metálicos.

Otra de las ventajas que presentan las atmósferas sintéticas respecto a los sistemas de generación está relacionada con la reducción de concentración de H₂ presente: las atmósferas sintéticas suelen tener un contenido en H₂ significativamente menor que en las atmósferas de generación; esto

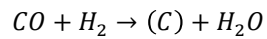
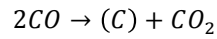
provoca un incremento sustancial en la densidad de la mezcla sintética de gases que se introduce en el horno, lo que permite reducir el caudal de gases requerido. El ejemplo más frecuente lo encontramos en aplicaciones de atmósfera de protección, en las cuales el gas endotérmico (40% H₂) es sustituido por una mezcla nitrógeno-hidrógeno con menos del 10% H₂. En este caso, la densidad evoluciona desde 0.595 a 0.90. Este incremento de la densidad de la atmósfera resulta en un incremento de la presurización del horno y como resultado en una purga más eficiente de las impurezas en la cámara. La experiencia demuestra que fácilmente pueden obtenerse reducciones de entre el 10 y el 20% en los caudales de gases a partir del empleo de atmósferas sintéticas más densas.

Application	Input atmosphere	Furnace atmosphere analysis, %					
		N ₂	H ₂	CO	CH ₄	Trace impurities	
						H ₂ O	CO ₂
Neutral harden	Endothermic + CH ₄	39	40	19	2	0.05	0.1
	N ₂ -2% CH ₄ , or 1% C ₃ H ₈	97	1	1	1	0.001	0.01
	N ₂ -5% CH ₃ OH-1% CH ₄	84	10	5	1	0.005	0.01
Carburize	Endothermic + CH ₄	37	40	18	5	0.05	0.1
	N ₂ -20% CH ₃ OH + CH ₄	37	40	18	5	0.05	0.1
	N ₂ -17% CH ₄ -4% CO ₂	70	16	7	7	0.005	0.05
	N ₂ -20% CH ₄ -5% H ₂ O	55	28	10	7	0.01	0.05
Carbonitride	Endothermic + CH ₄ + NH ₃	36	40	18	5	0.05	0.1
	N ₂ -20% CH ₃ OH + CH ₄ + NH ₃	36	40	18	5	0.05	0.1
	N ₂ -17% CH ₄ -4% CO ₂ + NH ₃	68	18	7	7	0.005	0.05
	N ₂ -20% CH ₄ -5% H ₂ O + NH ₃	53	30	10	7	0.01	0.05

Figura A3- 21: Composición típicas de atmósferas reactivas obtenidas a partir de diversos sistemas de generación para varias aplicaciones de tratamiento térmico. (2)

La tabla anterior compara las composiciones típicas de las atmósferas obtenidas por generación con las atmósferas sintéticas basadas en nitrógeno para aplicaciones que requieren atmósferas reactivas con potencial de carbono controlado.

Las reacciones químicas que generan el carbono que se transferirá a la superficie de las piezas son las ya indicadas anteriormente:



El requerimiento esencial en las aplicaciones que requieren transferencia de carbono es el control de proceso, no únicamente respecto al potencial de carbono de la atmósfera, sino también en lo relativo a disponibilidad de carbono para alcanzar las profundidades de capa requeridas.

BIBLIOGRAFIA

1. *Traitements thermiques localisés (2e partie)*. **Murry, Guy**. 389, Paris : PYC Editions, 2008, Vol. Traitement thermique.
2. **ASM International**. *ASM Handbook - Vol.4 Heat Treating*. 2002.
3. **B.Arzamasov, Yu.Lajtin y**. *Tratamiento químico-térmico de los metales*. s.l. : Editorial Mir, 1985.
4. *The dissociation of methanol used for the neutral hardening of steel*. **D.S.Mackenzie**. 1995.
5. *Some thermodynamic properties of carbon in austenite*. **Ellis T, Davidson I.M., Bodsworth C**. 1963.
6. <http://www.industrialgasplants.com>. [En ligne]
7. <http://www.thermaldynamix.com>. [En ligne]
8. **Linde, Abelló**. *Aplicación de gases industriales en los procesos de tratamiento térmico*.

Anexo 4

Introducción a la
cementación en hornos de
baja presión y temple en
gas

Contenido Anexo 4

A4.1.	Descripción de la tecnología de cementación en baja presión.....	5
A4.1.1.	Procedimiento de cementación en baja presión	9
A4.1.2.	Reacciones de descomposición de los gases	11
A4.1.3.	Parámetros del proceso de cementación	18
A4.2.	Temple en gas	26
A4.2.1.	Gases de temple	28
A4.2.2.	Modelos de enfriamiento con aceites y gases.....	31
A4.2.3.	Equipamiento de temple en gas	36
A4.2.4.	Control de la distorsión durante el temple en gas	43
	Bibliografía.....	47

A4.1. DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE CEMENTACIÓN EN BAJA PRESIÓN

A4. 5

La cementación en vacío o en baja presión consiste en un procedimiento de cementación que se lleva a cabo en condiciones de no-equilibrio, siguiendo un esquema de inyección de carbono en el material y posterior difusión. Fundamentalmente, el proceso se efectúa en cuatro etapas básicas: el componente de acero que se va a cementar es calentado hasta austenización total de la estructura y en condiciones cercanas al vacío, posteriormente se introduce una determinada presión parcial de un hidrocarburo gaseoso, seguido de una etapa de difusión que se efectúa nuevamente en condiciones próximas al vacío, y finalmente el material es templado (en aceite o en gas). (ASM International, 2002)

El debate sobre la cementación en baja presión como alternativa a la cementación atmosférica se inicia en la década de los 70, como resultado de los incrementos de costes asociados al consumo de gas natural en los procesos de tratamiento térmico: potencialmente, esta tecnología podía proporcionar considerables ahorros a partir de la disminución en el consumo de gases industriales durante el proceso. Sin embargo, la tecnología de hornos de la época alcanzaba presiones de trabajo de entre 100 y 600 mbar, y como resultado se generaban inasumibles cantidades de residuos sólidos de hollín sobre las piezas y sobre los elementos internos de la instalación. Tampoco los resultados obtenidos en la cementación resultaban suficientemente aceptables.

Fue con la reducción de las presiones de proceso, en el rango de 3 a 20 mbar, así como la optimización y desarrollo en aspectos tales como la definición de las etapas de inyección y difusión, composición de las atmósferas y la introducción de gases alternativos al propano, como se mejoraron los resultados y se resolvieron algunos de los problemas previos.

La tecnología de tratamiento térmico en hornos de cementación en baja presión mediante una secuencia de inyección de pulsos de hidrocarburos presenta diversas e importantes ventajas respecto a procesos de cementación en atmósfera tradicionales.

Podemos resumir en los siguientes puntos algunas de las ventajas principales que presenta esta tecnología respecto a los procesos de tratamiento en instalaciones atmosféricas:

- Mayor reproducibilidad del proceso mediante el uso de programas de simulación y controles de proceso automatizados.
- Facilidad de integración de las instalaciones en el proceso de fabricación.
- Posibilidad de reducir los tiempos de ciclo: a partir del incremento en la temperatura del horno y debido al aumento del contenido en carbono en la superficie de la pieza durante el proceso.

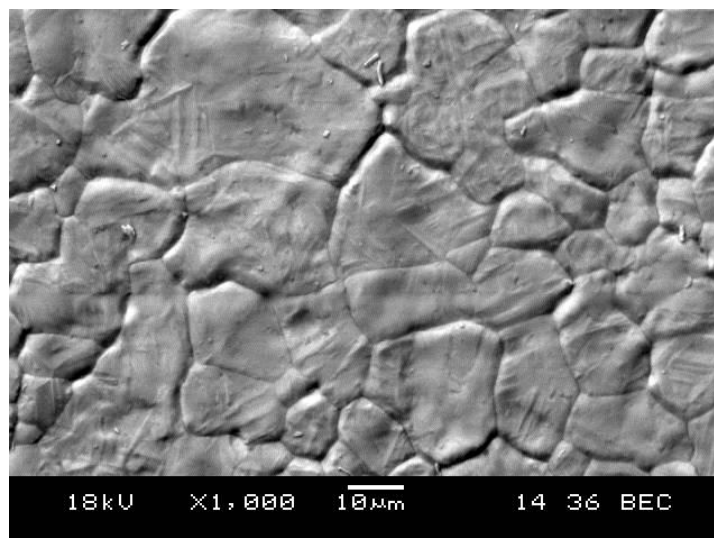
- Proceso completamente automatizado, lo que aumenta la uniformidad de resultados entre cargas.
- Menor consumo energético debido en parte a la posibilidad de parar la instalación cuando no es requerida.
- Reducción en el consumo de gases de proceso.
- Proceso más eficiente medioambientalmente, puesto que las emisiones de carbono a la atmósfera en relación a los procesos tradicionales son significativamente menores (relación 300:1).
- Mayor limpieza de procesos y componentes mediante la utilización de temple en gas a alta presión.
- Ausencia de llamas en la instalación, no requiriéndose protecciones de seguridad específicas.

En lo relativo a los resultados de tratamiento térmico se constatan las siguientes ventajas principales:

- Mayor uniformidad de la profundidad de capa resultante.
- Ausencia de oxidación intergranular en la superficie de las piezas.
- Se evita la fragilidad por hidrógeno debido a la baja presión parcial de hidrógeno y largas etapas de difusión en condiciones de vacío y a alta temperatura.
- Mejora en el comportamiento a fatiga del componente.
- Cementación de taladros de pequeño diámetro y taladros ciegos.
- Mayor control de la distorsión de las piezas, lo que posibilita en algunos casos eliminar operaciones posteriores al tratamiento térmico.
- No se requiere de la formación de una atmósfera compleja.
- El consumo de gases de cementación se reduce sustancialmente.
- Puede plantearse la integración de la instalación de tratamiento en el proceso de manufactura del componente.
- La tecnología de hornos para LPC posibilita altas temperaturas de cementación.

Si bien la cementación en baja presión evita la presencia de oxidación intergranular, sí se han observado otros efectos en la superficie de los componentes tratados con este proceso:

- Efusión de elementos de aleación, particularmente manganeso.
- Formación de carburos en los límites de grano cuando los parámetros del proceso no se optimizan.
- Ataque de las fronteras de grano austenítico durante la etapa de cementación, el cual puede ser considerado como una microentalla desde un punto de vista de fatiga.



**Figura A4- 1: Detalle de la morfología de la superficie de un acero cementado en baja presión.
(Delphi Diesel Systems, SL)**

La cementación en instalaciones de baja presión se basa en la inyección de series de pulsos de hidrocarburos gaseosos, exentos de oxígeno y en condiciones de vacío (generalmente en el rango de 5 a 20 mbar), a la temperatura de cementación y dentro de una cámara de proceso. La duración de estas inyecciones varía entre unos segundos y varios minutos. El bajo nivel de presión permite alcanzar un elevado contenido de carbono en la atmósfera, con bajo riesgo de generar hollín y depósitos sólidos durante la etapa de enriquecimiento. Esto, junto con la posibilidad de ajustar el caudal de gas necesario en un amplio rango, permite que grandes superficies puedan ser cementadas con resultados satisfactorios.

En contraste con los procesos de cementación atmosférica, la cementación en baja presión no requiere necesariamente de la utilización de gases de transporte.

	Cementación gaseosa	Cementación en baja presión
Tecnología de horno	Atmosférico	Vacío
Gases	Mezcla, conteniendo CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ y N ₂ .	Propano, acetileno, etileno y otros hidrocarburos y sus mezclas
Consumo de gases (función de temperatura)	3 a 5 veces el volumen del horno por hora	Aprox. 100 l/h·m ² de carga
Temperatura máxima	1000°C	1300°C
Integración en línea	No (riesgos de seguridad)	Si
Proceso gestionado por	Composición de gases y tiempo de cementación	Duración de los pulsos de cementación y difusión, y caudal de gas.

Proceso controlado por	Potencial de carbono	-
Efectos en superficie metálica	Oxidación intergranular	Ataque térmico
Cementación taladros y orificios	Eficacia limitada	Hasta una relación L/D=30

La tabla siguiente presenta valores típicos de los coeficientes de transferencia de carbono, también denominado flujo de carbono, expresados en $\text{g/m}^2\cdot\text{h}$ durante los primeros 15 minutos para la cementación atmosférica con atmósfera endotérmica, y para LPC con diferentes gases de cementación y temperaturas. Entre paréntesis se indican los valores observados hasta alcanzar el porcentaje de saturación en carbono de la superficie metálica. (Linde AG)

Este coeficiente cuantifica la velocidad de la cementación, y se define como la masa de carbono que es transferida y difundida en una superficie cementada de 1 m^2 y por hora.

Temperatura	Atmósfera	Cementación en baja presión				
		Endogas	Metano	Propano	Etileno	Acetileno
900°C			0	60 (60)	55	55 (50)
950°C	35		0	90 (90)	80	79 (110)
1000°C			0	130 (140)	120	145 (235)
1050°C			20	185 (195)	180	200 (335)

Debe tenerse en cuenta que conseguir un elevado flujo de carbono no necesariamente resulta en una ventaja, dado que los aceros pueden absorber carbono de forma limitada: una sobresaturación de la fase austenítica del acero conducirá a la formación de carburos metálicos en la superficie del componente, lo cual debe por lo general evitarse en la medida de lo posible.

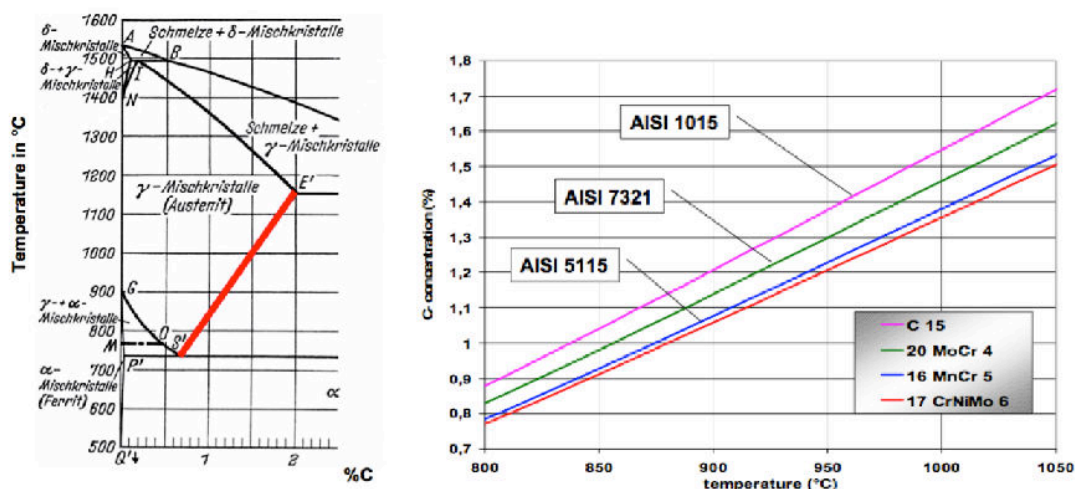


Figura A4- 2: %C mínimo para la formación de carburos metálicos en función de la temperatura, para diferentes aceros de cementación.

A4.1.1. PROCEDIMIENTO DE CEMENTACIÓN EN BAJA PRESIÓN

A4. 9

Esencialmente, el proceso de tratamiento LPC se lleva a cabo de la forma siguiente: después de introducir la carga en el horno, éste es evacuado hasta alcanzar una presión del orden de 10 mbar; llegado este punto, la cámara de tratamiento está libre de oxígeno y el ciclo de calentamiento puede iniciarse. La carga es calentada hasta temperaturas en el rango de 790 a 1040°C, de forma directa o en mediante sucesivas etapas intermedias, en función de la temperatura requerida y de la sensibilidad a la deformación de los componentes.

Una vez la temperatura de la carga es homogénea y se sitúa en el rango requerido, se inicia la primera etapa de cementación mediante la introducción de un hidrocarburo en la cámara del horno a presiones entre 10 y 1000 mbar. Durante esta etapa tiene lugar la absorción de carbono por parte de la fase austenítica, hasta alcanzar el límite de saturación de carbono en la austenita, el cual dependerá de la aleación del acero y de la temperatura de austenización. La transferencia de carbono que se consigue es tan eficaz que se consigue la saturación en carbono de la austenita sólo después de unos pocos minutos. Entonces la primera fase de cementación se detiene mediante la interrupción el suministro de gas y evacuando la cámara del horno.

Es difícil medir in situ la eficiencia de las reacciones de descomposición del hidrocarburo, por lo que no puede determinarse el correspondiente potencial de carbono de la atmósfera en los procesos de cementación en baja presión. Asimismo, debido a la ausencia de oxígeno en los gases de la atmósfera, tampoco pueden utilizarse los métodos de control basados en la medición de este elemento para establecer un potencial de carbono.

Se requiere una mínima presión parcial de gas cementante para asegurar una rápida saturación de la austenita: esta presión parcial mínima depende básicamente de la temperatura de trabajo, de la superficie activa de la carga y de la composición de los gases cementantes. Por encima de esta presión parcial mínima, la presión parcial del gas cementante no está en relación con el potencial cementante de la atmósfera. Por otra parte, tampoco es aconsejable aumentar en exceso la presión parcial de cementación para evitar un exceso de deposiciones de carbono sólido en los elementos de la instalación.

El carbono transferido durante la etapa de cementación difunde hacia el interior del acero, lo que provoca que el contenido en carbono en la superficie de la pieza disminuya. Dado que el proceso tiene lugar en condiciones próximas al vacío y en presencia de un gas inerte, la difusión únicamente tiene lugar en una dirección, no ocurriendo procesos de pérdida de carbono desde la superficie metálica hacia la atmósfera.

Dependiendo de la profundidad de capa requerida, se programan nuevas etapas de cementación y difusión de forma cíclica. La duración de las etapas de inyección de hidrocarburo disminuyen a medida que aumenta la profundidad de capa alcanzada. Una vez obtenida la capa requerida, la temperatura de la carga se reduce hasta alcanzar la temperatura de austenización, y finalmente se envía la carga a la fase de temple.

A4. 10

Un factor importante del proceso y que debe ser controlado es el caudal de gas cementante: este caudal debe ser el suficiente para conseguir que la cementación sea homogénea en toda la carga. En la práctica se consigue un balance dinámico entre el carbono suministrado a la superficie y la velocidad de difusión en el acero.

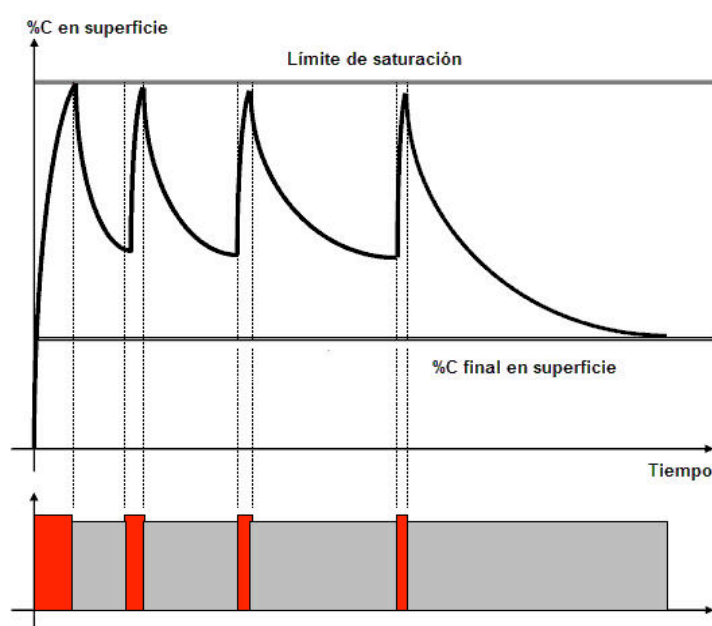


Figura A4- 3: Evolución del %C en superficie durante el proceso de cementación.

La anterior figura muestra de forma esquemática la evolución en el tiempo del porcentaje de carbono en la superficie de la pieza durante todo el proceso de cementación en baja presión. Puede observarse que con cada inyección de hidrocarburo, el porcentaje de carbono absorbido en superficie aumenta rápidamente y se detiene con la finalización de la aportación de gas. A continuación se inicia una etapa de difusión que se detiene con el inicio del siguiente pulso de hidrocarburo. Finalmente tiene lugar la etapa de difusión final, que permite conseguir la profundidad de capa requerida con un porcentaje de carbono en superficie también ajustado a los requerimientos de la pieza.

El proceso de cementación en baja presión se lleva a cabo utilizando diversas atmósferas o medios de cementación:

- hidrocarburos puros
- mezcla de hidrocarburos y gases nobles o hidrógeno.

En algunas ocasiones, como cuando se utiliza acetileno, el hidrocarburo se mezcla con nitrógeno, el cual actúa como diluyente y con el objetivo de disminuir la actividad del gas principal o para reducir la tendencia a la formación de residuos sólidos carbonosos. Tanto el nitrógeno como el hidrógeno, actúan también como gas de transporte del hidrocarburo cementante durante el proceso.

La selección del tipo de gas depende de factores como la aplicación, la forma o geometría de las piezas a cementar y la temperatura del proceso.

A4. 11

La cementación se lleva a cabo en vacío, con una atmósfera formada a partir de hidrocarburo cementante y con gas inerte, lo que elimina la posibilidad de que se genere oxidación intergranular, especialmente perjudicial en aceros que contienen cromo y manganeso. Por el contrario, los problemas que pueden observarse están relacionados con cementación desigual, o problemas relacionados con el temple en gas, puesto que este medio de temple tiene una menor severidad de temple que el aceite. Cuando las piezas son de grandes dimensiones o la carga está muy empaquetada, la eficacia del temple en gas puede ser inadecuada.

Posteriormente a la etapa de cementación, las piezas son enviadas a la fase de temple, que en muchos casos suele ser temple con gas a alta presión (6 a 20 bar de nitrógeno, helio, u otros medio gaseosos de enfriamiento), si bien también puede utilizarse temple en aceite si la instalación está preparada para ello.

A4.1.2. REACCIONES DE DESCOMPOSICIÓN DE LOS GASES

Las reacciones de descomposición de las moléculas del hidrocarburo tienen lugar por descomposición térmica o pirólisis. En determinados casos, cuando se requiere cementar piezas con superficies complejas, esta descomposición puede ser activada mediante plasma. En estos casos, la carga de trabajo se establece como uno de los electrodos.

Los hidrocarburos que pueden utilizarse son metano, etileno, propano y acetileno, si bien en la práctica los más extendidos son los dos últimos, debido a su mayor capacidad de transformación. Las reacciones de descomposición que tienen lugar dependen del tipo de gas que se utilice en el proceso.

La reacción de pirólisis de los hidrocarburos es siempre dependiente de la temperatura. Los gases etano y propano en su descomposición forman metano, el cual no se descompone por debajo de 4 mbar y a temperaturas inferiores a 1000°C. Asimismo, el acetileno forma estructuras aromáticas e hidrocarburos de cadena larga por debajo de 800°C. Por encima de 800°C se disocia siguiendo reacciones complejas, y en su última etapa requiere de una superficie metálica que actúa como catalizador.

En la figura que presenta la variación de la energía libre de formación del hidrocarburo con la temperatura, se observa como el comportamiento del acetileno difiere respecto al resto de hidrocarburos: este gas presenta en un amplio rango de temperaturas una elevada inestabilidad térmica, si bien, lo peculiar del acetileno es que a medida que aumenta la temperatura muestra una menor tendencia a la descomposición. Esto explica porqué su actividad se reduce sensiblemente a medida que la temperatura aumenta.

La tabla siguiente presenta de forma resumida algunos aspectos relevantes para cada uno de los hidrocarburos:

Metano	Es un gas estable hasta altas temperaturas. Reacción de pirolisis por debajo de 4 mbar y por encima de 1000°C.
Etano	Descomposición térmica por encima de 600°C.
Propano	Requiere una presión inferior a 10 mbar y una temperatura superior a 700°C.
Eteno	Requiere una presión inferior a 10 mbar y una temperatura superior a 850°C.
Acetileno	Reacciones complejas. Por encima de 800°C la molécula se disocia, mientras que por debajo de 800°C, tienen lugar reacciones de polimerización. Proporciona las mayores ventajas en el rango de 900 a 950°C, siendo este un rango bastante habitual en procesos de cementación. En contraposición con el propano, este gas permite cementar geometrías complejas y taladros profundos y de pequeño diámetro. Este gas se estabiliza a medida que aumenta la temperatura, modificando sus reacciones de disociación, mientras que la disponibilidad de carbono es mayor cuando la temperatura es menor.

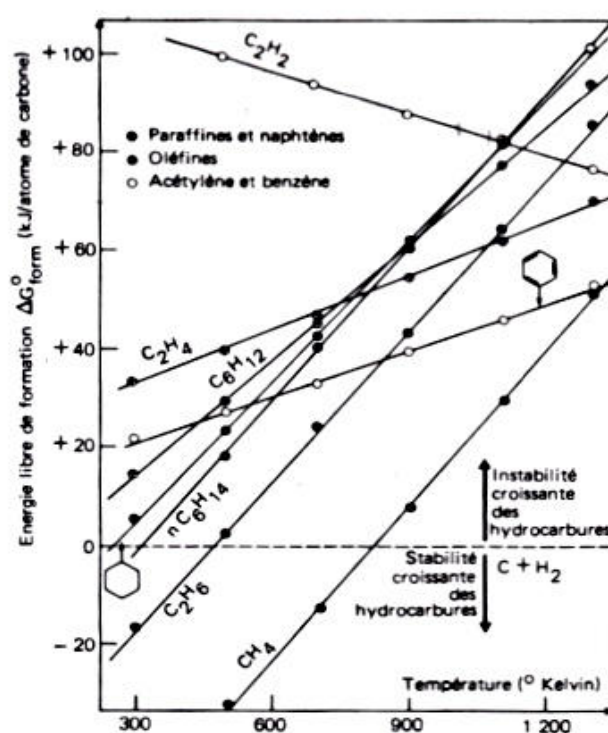


Figura A4- 4: Gráfico de entalpía o energía libre asociada a las reacciones de formación del hidrocarburo a partir de sus componentes base en función de la temperatura.

Inicialmente, el propano fue el hidrocarburo más utilizado, puesto que este gas se utilizaba también en la cementación atmosférica. La disociación del propano es un proceso relativamente complejo debido a la diversidad de componentes intermedios que se forman de forma simultánea durante su pirólisis. La presencia de tal variedad de hidrocarburos y radicales libres conduce a la formación de cadenas complejas y a la recombinación de moléculas.

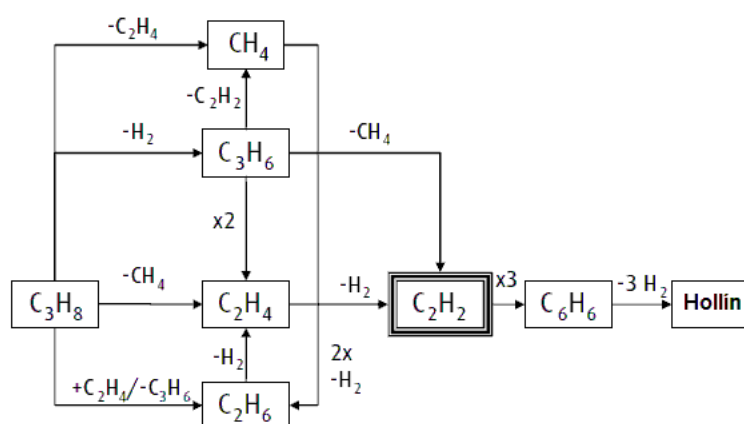


Figura A4- 5: Estructura de pirólisis del propano. (Linde AG)

El metano que se genera no es útil desde un punto de vista de cementación, debido a su alta estabilidad térmica.

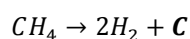
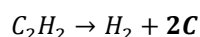
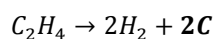
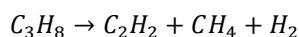
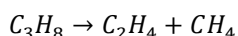
De entre las especies intermedias que se forman durante el proceso de pirólisis, el acetileno es el único gas que efectivamente participa en la cementación del metal. La cantidad de propano que deberá introducirse para obtener una cementación uniforme depende de hecho de la cantidad de acetileno que se forme durante el proceso de pirólisis. Esto explica porqué cuando se utiliza propano como gas cementante se aplica un exceso de caudal, siendo además siempre más elevados que cuando se utiliza acetileno.

Por tanto, cuando se aplica un caudal en exceso, el propano proporciona buenos resultados metalúrgicos, puesto que se disocia fácilmente a temperaturas por encima de 600°C, rompiendo la molécula después de diversas reacciones intermedias, en átomos de carbono libres, hidrógeno y metano.

La pirolisis del propano tiene lugar preferentemente en la superficie metálica caliente de los componentes, la cual posee un cierto efecto catalítico. Sin embargo, esta descomposición térmica también tiene lugar incluso antes de que el gas entre en contacto con la superficie del acero, y como resultado puede tener lugar la recombinación de los átomos de carbono con otros fragmentos de propano, dando lugar a procesos de polimerización que tienen como resultado la precipitación de hollín y alquitranes. Esta reacción está en competición directa con la reacción de cementación. La formación incontrolada de hollín resulta en una pobre transferencia de carbono hacia las piezas y en pérdida de productividad debido a la necesidad de operaciones de mantenimiento adicionales en la instalación. Adicionalmente, la precipitación de estos residuos en la cámara y en las conducciones provoca problemas con el sistema de bombas de vacío.

La pirolisis del propano ocurre en primer lugar a través de la formación de H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 y C_2H_2 . C_2H_2 y C_2H_4 reaccionan en la superficie metálica de las piezas para formar H_2 y/o CH_4 , dando lugar a la cementación de la superficie de la pieza.

Las principales reacciones de disociación del propano se pueden resumir de la siguiente forma:



También se forman pequeñas cantidades de otras moléculas orgánicas de cadena larga.

Este gas se utiliza de forma bastante extensiva. Sin embargo, cuando se requiere cementar taladros de cierta longitud o agujeros ciegos y con una relación longitud-diámetro mayor de 10, el uso de propano está desaconsejado.

Se han ensayado otros hidrocarburos saturados, si bien también pueden presentar cierta tendencia a la formación de residuos sólidos no deseables. El metano es prácticamente no reactivo a las bajas presiones de trabajo y requiere temperaturas de por lo menos 1040°C o la activación mediante plasma. En todo el rango de temperaturas ensayado, el nivel de descomposición del metano es inferior al 3%, resultando por tanto un gas poco relevante para aplicaciones de cementación en el rango de trabajo de milibares. Para conseguir un grado de descomposición térmica de este hidrocarburo suficiente, su presión parcial debe aumentarse por encima de 300 mbar. Sin embargo en este rango de presiones, el sistema LPC desarrolla la formación de residuos sólidos de hollín.

Se han conseguido mejores resultados utilizando gases hidrocarburos no saturados, tales como eteno y particularmente acetileno. La razón consiste en los elevados ratios de descomposición que presentan estas moléculas en las condiciones de la LPC, así como la baja tendencia a desarrollar reacciones de polimerización. Otros gases están siendo investigados para aplicaciones de LPC, tales como ciclohexano o mezclas específicas de eteno, acetileno e hidrógeno, mostrándose bastante eficaces en la cementación y proporcionando buenos niveles de limpieza.

Por su parte, la molécula de acetileno se descompone en varias etapas intermedias, si bien en general pueden resumirse en la formación de C, H₂ y pequeñas cantidades de CH₄:

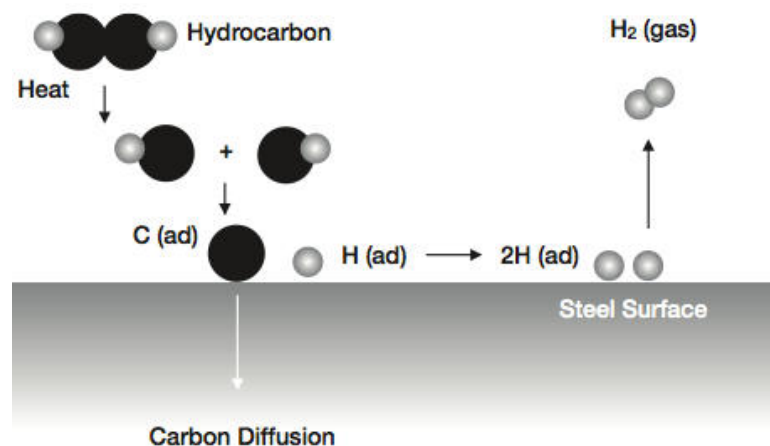
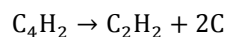
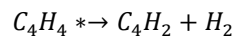
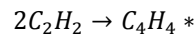


Figura A4- 6: Mecanismo de disociación del acetileno en la superficie del acero. (Air Products)

La gran aceptación que tiene el acetileno como medio de cementación en procesos LPC, se basa en que este gas tiende a disociarse sólo en la superficie del metal, y por tanto se consigue que penetre de forma eficaz incluso en taladros ciegos profundos y en geometrías complejas.

Por otra parte, el acetileno en su descomposición se disocia en dos átomos de carbono activos sin formar fragmentos vinílicos (en comparación con el único átomo de C más los fragmentos de moléculas secundarias producidas por la disociación del propano y el etileno). El acetileno se disocia sin formar metano no reactivo, y produce comparativamente poco hollín.

A4. 16

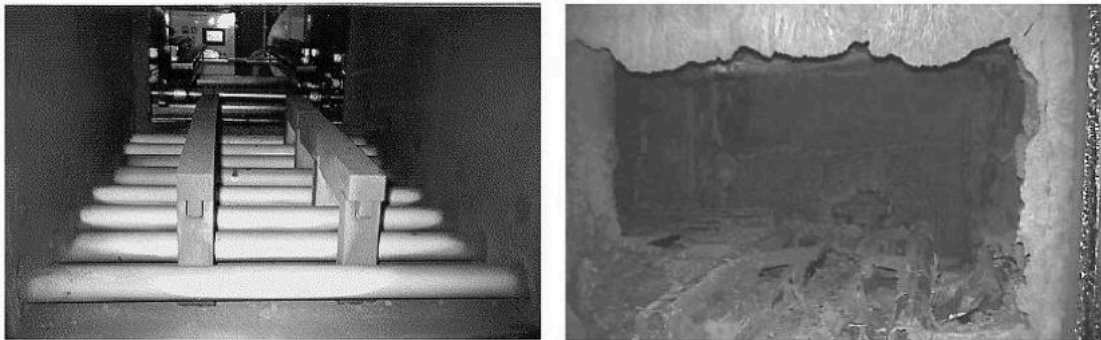


Figura A4- 7: Comparativa del grado de limpieza de la cámara de cementación después de varios años de operación. Izquierda: acetileno; derecha: propano. (Cheetham)

A partir de la medición de las concentraciones de los gases en las emisiones pueden determinarse los productos de las reacciones, observándose que la pirólisis del propano es significativamente más rápida que la pirólisis del acetileno.

Como se ha indicado, uno de los inconvenientes ligados a la utilización de propano es que las reacciones de descomposición térmica dan lugar a productos residuales formados por estructuras de hidrocarburos de cadena larga, que se presentan en forma de sólidos bituminosos que progresivamente se depositan sobre los elementos internos del horno y las instalaciones. Los factores responsables de la formación de estos compuestos son:

- el elevado tiempo de residencia
- la temperatura

La forma que se ha encontrado para minimizar la formación de estas largas cadenas de hidrocarburos es mediante el uso de mezclas de hidrocarburo/nitrógeno o hidrocarburo/hidrógeno durante el proceso de cementación.

La introducción de una proporción del 10 al 40% de nitrógeno respecto al caudal total resulta en una reducción de las reacciones de aromatización. Por otra parte, el efecto del hidrógeno consiste en limitar las reacciones de deshidrogenación.

Criterio	Acetileno C_2H_2	Propano C_3H_8
Utilización del carbono (m_{c_carga} / m_{c_gas})	~60%	~25%
Cementación taladros profundos	+++	-
Tratamiento de gases de escape	No requerido	Requiere quemado térmico
Distribución de gas en cámara	Algunos inyectores (distribución no crítica)	Requiere inyección de gas uniforme en la cámara de tratamiento
Gas de transporte (mejora la dinámica del gas y reduce los productos residuales)	No necesario	Necesario
Distancia mínima entre piezas en la carga	5 a 10 mm	20 a 25 mm
Estructura de los productos residuales	Fase sólida en forma de polvo, seca, similar a hollín	Residuo fibroso, viscoso, bituminoso

A4. 17

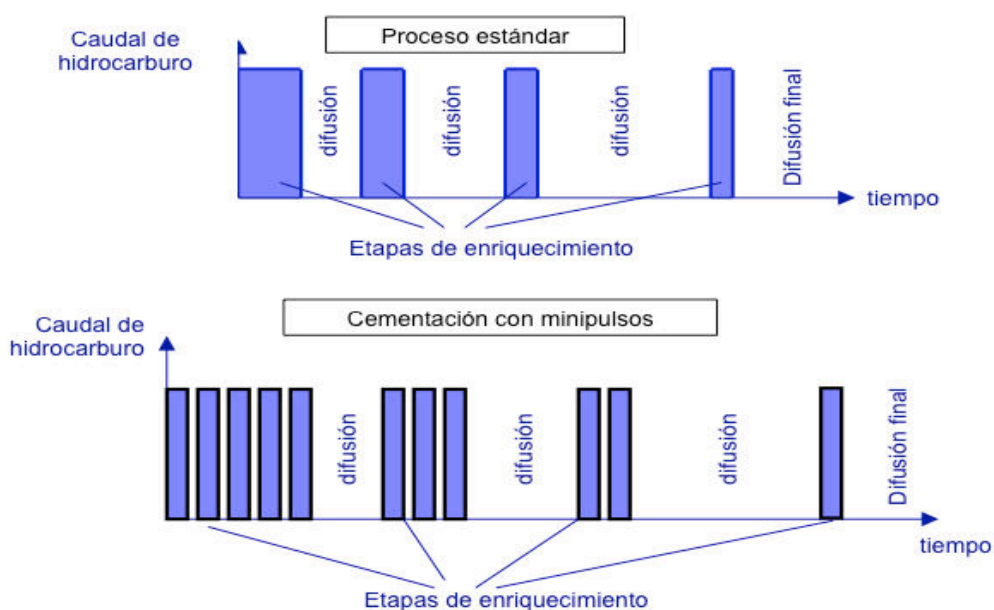


Figura A4- 8: Esquema del diagrama de cementación: proceso estándar y proceso con minipulsos.

Otra forma de limitar la formación de estos residuos durante el proceso consiste en utilizar minipulsos de cementación (tiempos < 100 s) y etapas de minidifusión (tiempos < 15 s). Esto proporciona una disminución del tiempo de residencia del gas, lo que provoca la interrupción de las reacciones de aromatización.

Proceso	Propano	Acetileno
LPC estándar	• Cargas con densidad estándar • Geometría de piezas simple • Requerimientos de homogeneidad de cementación normales	• Cargas de alta densidad • Elevados requerimientos de homogeneidad de cementación
LPC con minipulsos	• Cargas con alta densidad • Elevados requerimientos de homogeneidad de cementación	• Geometría de piezas compleja

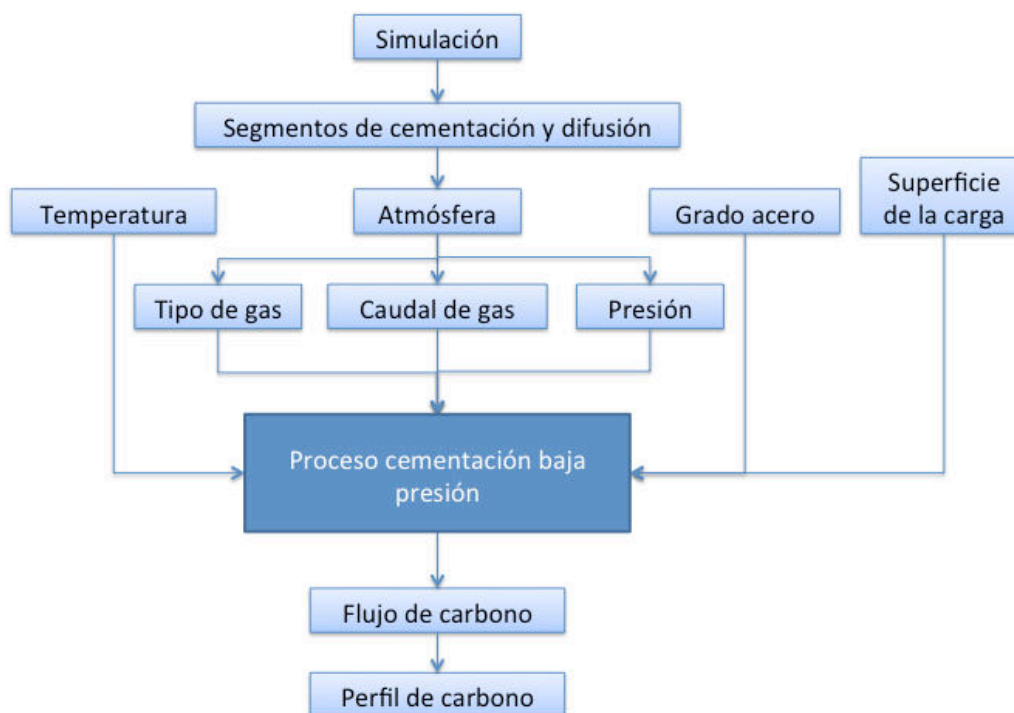
A4.1.3. PARÁMETROS DEL PROCESO DE CEMENTACIÓN

En anteriores apartados se ha hecho referencia a los parámetros más relevantes de la tecnología de cementación en baja presión. Uno de los aspectos fundamentales del proceso es definir de forma correcta la secuencia de pulsos de hidrocarburo así como las etapas de difusión. Para ello, los fabricantes de las instalaciones han desarrollado programas de simulación que, a partir de diversos parámetros relevantes que son introducidos manualmente, determina de forma automática el esquema de pulsos y difusiones que deben programarse en la receta del proceso para alcanzar las características finales requeridas en el componente tratado.

Generalmente, este software demanda la introducción de parámetros básicos tales como temperatura de proceso tipo de acero, factor de flujo de carbono, %C de saturación, %C intermedio, profundidad de capa requerida y %C final en superficie.

Una dificultad implícita a los datos obtenidos a partir de las simulaciones con estos paquetes de software es que existe una limitada cantidad de información disponible relativa a la transferencia de carbono durante las etapas de cementación, y la información disponible relativa a la interrelación de factores como temperatura, tipo de gas, grado del acero, condiciones de formación de carburos y su disolución, relacionados con el factor de flujo de carbono, no es conocida de forma precisa.

Generalmente, estos programas de simulación están basados en datos y resultados experimentales, por lo que en la práctica la receta que proporcionan debe confirmarse con ensayos prácticos.



A4. 19

Figura A4- 9: Esquema que agrupa los principales factores que determinan el proceso de cementación en baja presión.

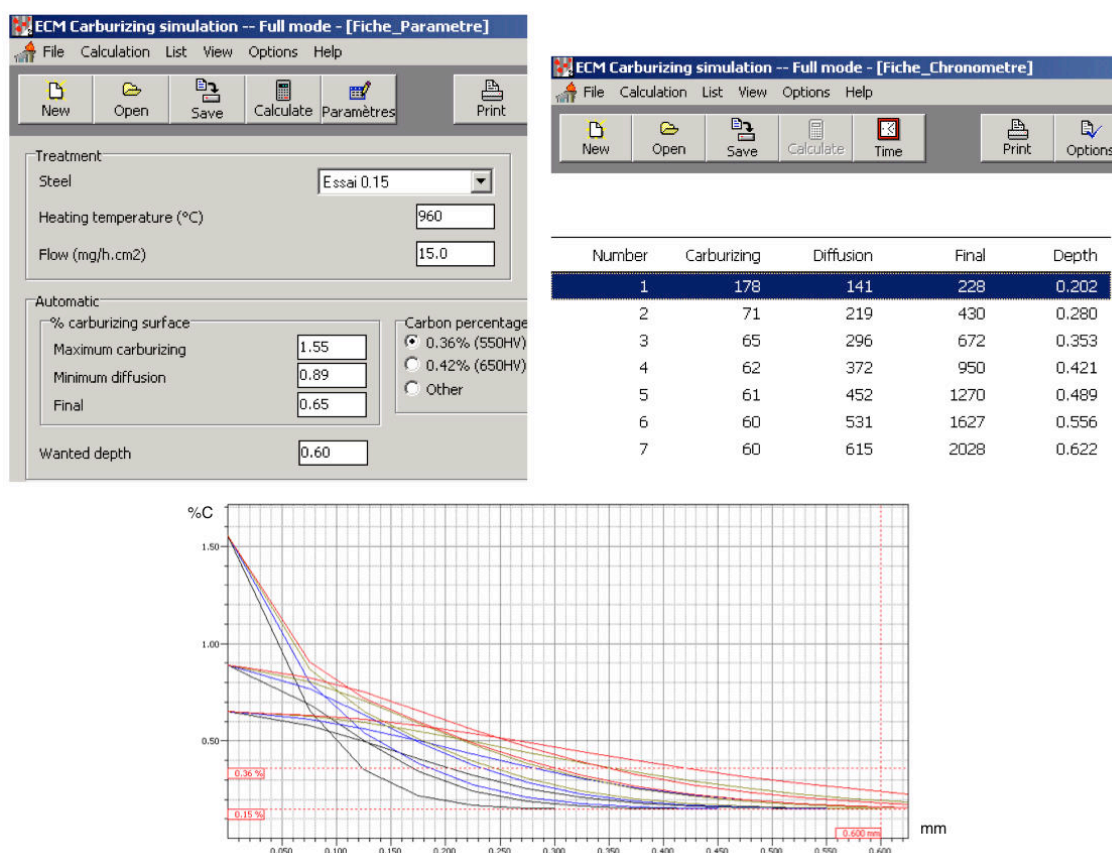


Figura A4- 10: Software de simulación de ECM para definir recetas en procesos de cementación en baja presión.

Es una práctica habitual obtener el valor del flujo de carbono a partir de ensayos termogravimétricos: se distribuyen diversas probetas de acero, habitualmente en forma de discos, en la carga experimental que son tratadas con la receta definida a partir del simulador; estas probetas se construyen con el mismo tipo de acero que las piezas y son pesadas de forma precisa antes y después del tratamiento térmico y de esta forma se puede determinar a partir de la diferencia de peso la cantidad de carbono absorbida por el acero, el cual, relacionado con la superficie de la probeta y con el tiempo de cementación obtenido a partir de la receta, permite determinar de forma experimental el valor real del factor de flujo de carbono para el proceso ensayado con la temperatura, grado del acero y tipo de hidrocarburo reales.

La concentración de carbono final resultante en la superficie de la pieza es regulada a partir del tiempo de difusión final, posterior a los pulsos de gas cementante.

Un factor de primer orden del proceso es lógicamente la temperatura: aumentando la temperatura del proceso puede reducirse el tiempo de proceso requerido para alcanzar la profundidad de capa requerida, pudiéndose conseguir así un proceso más económico. La reducción de tiempo se consigue como resultado por una parte del aumento de la velocidad de difusión del carbono en el acero, y por otra debido a que el acero es capaz de disolver mayor cantidad de carbono a medida que la temperatura aumenta. Este comporta que si aumenta la temperatura de proceso, deba incrementarse también el caudal de gas cementante para proporcionar suficiente carbono a la superficie, dada la mayor transferencia de carbono que permite el material.

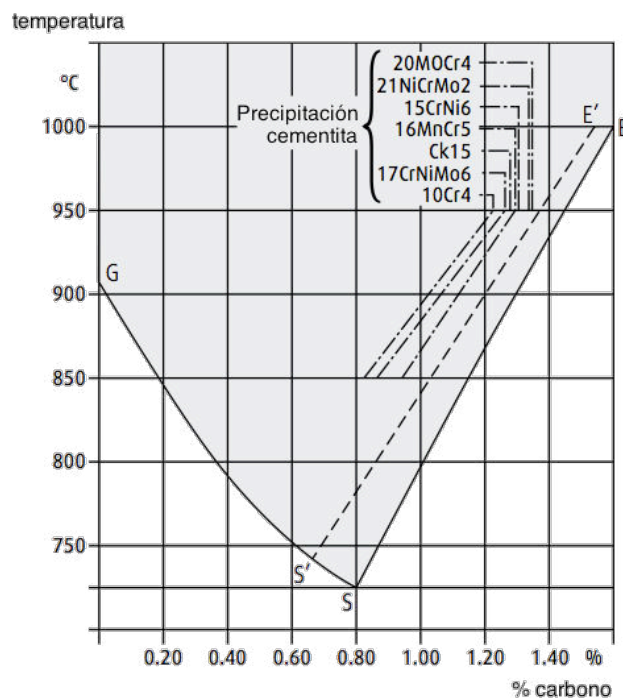


Figura A4- 11: Variación del %C máximo soluble en austenita en función de la temperatura para diferentes aceros. (Linde AG)

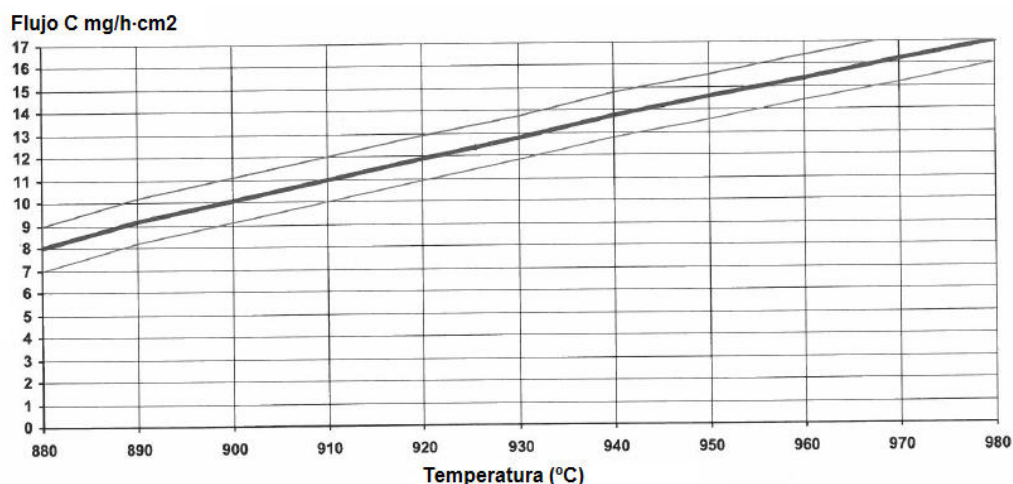


Figura A4- 12: Variación del flujo C con la temperatura, para C₂H₂. (Delphi Diesel Systems, SL)

Los hornos de cementación gaseosa suelen tener el máximo de temperatura alrededor de 960°C. Trabajar continuamente por encima de esta temperatura puede dañar al horno de forma severa. Por el contrario, la estructura de un horno de cementación de baja presión coincide básicamente con un horno de vacío, por lo que puede alcanzar sin problema temperaturas de 1100°C o incluso superiores.

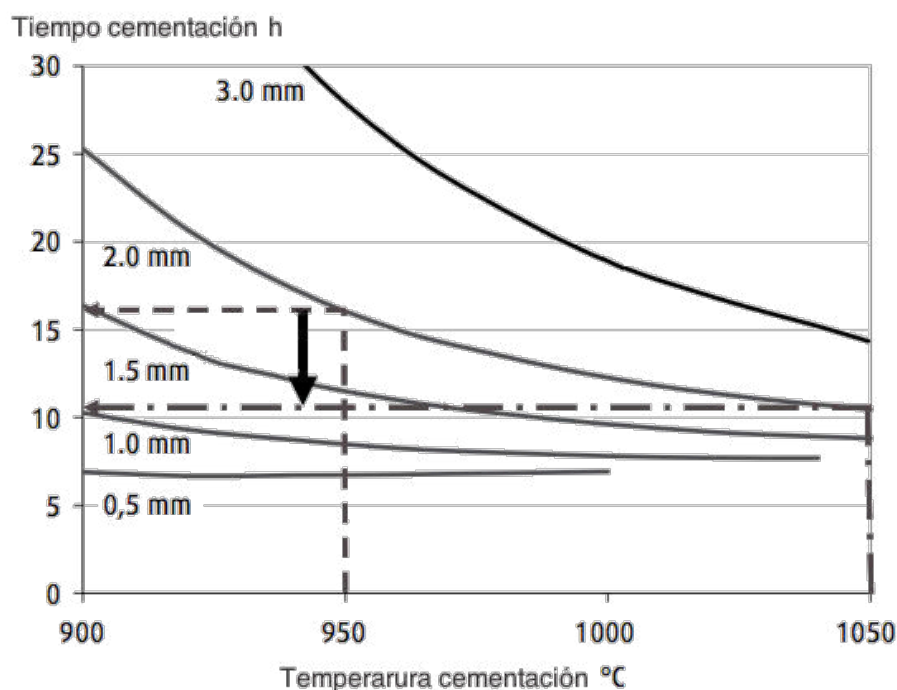


Figura A4- 13: Ejemplo de variación de tiempo de cementación en función de la temperatura. Acero 18CrNiMo7-6. (Linde AG)

Por tanto, este proceso permite mayor libertad para escoger la temperatura de proceso más adecuada, de acuerdo a la profundidad de capa requerida y el tipo de acero.

Otro factor relevante en el proceso es el factor de transferencia de carbono. En la práctica podemos clasificar en dos grupos los parámetros importantes del proceso de tratamiento térmico: los parámetros que determinan la transferencia de carbono desde la atmósfera hacia la superficie del metal, y los que determinan el proceso de difusión en el material. De la combinación de ambos resulta el factor de transferencia de carbono.

El proceso LPC permite una alta transferencia de carbono hacia la superficie del acero: así como en la cementación atmosférica el enriquecimiento está basado en el potencial de carbono de la atmósfera cementante, en el caso de la cementación en baja presión este se caracteriza por el flujo de carbono ($\text{mg/h}\cdot\text{cm}^2$): la transferencia de carbono que es adsorbido por la superficie del acero depende de la temperatura, del caudal de hidrocarburo, de la superficie a tratar y de la presión parcial del hidrocarburo (en el caso de mezclas gaseosas). Esta transferencia de masa se sitúa en el rango de 100 a 200 $\text{g/m}^2\cdot\text{h}$. Esto permite que en sólo unos minutos se pueda conseguir que la superficie de la pieza alcance un contenido en carbono de más del 1%. El balance dinámico entre el carbono proporcionado y la velocidad de difusión en el material puede crearse reduciendo el flujo de masa de carbono. Esto se consigue reduciendo el caudal de gas de proceso durante la cementación. (Herwing Altena)

Hidrocarburo	Productos de disociación	Flujo de C medio ($\text{g/m}^2\cdot\text{h}$)
Acetileno	$2\text{C} + \text{H}_2$	150
Etileno	$\text{CH}_4 + \text{C}$	120
Metano	$\text{CH}_4 + \text{C}$	<5
Propano	$\text{C}_x\text{H}_y + \text{C} + \text{H}_2$	130

(Daniel H.Herring)

El flujo de carbono también depende en cierta medida del tipo de gas utilizado en la cementación: el rendimiento de carbono, o cantidad de carbono transferido a las piezas en relación a la cantidad de carbono introducido en la célula de tratamiento a partir de las inyecciones de hidrocarburo, varía en función del tipo de gas.

El acetileno proporciona un rendimiento significativamente mayor que otros gases como el metano o el propano. Como resultado de ello, los caudales de trabajo requeridos en el proceso serán distintos en función del tipo de hidrocarburo que se utilice, siendo en la práctica mayores los caudales requeridos de propano que los de acetileno, para unas mismas condiciones de temperatura y superficie de carga.

Hidrocarburo	Tipo de descomposición	Rendimiento (%)
Acetileno	Catalítica	65 – 85
Metano	Térmica	5 – 20
Propano	Térmica	5 - 20

(Daniel H.Herring)

A4. 23

No obstante, siempre que el caudal de hidrocarburo sea suficiente, el tipo de gas utilizado prácticamente apenas tiene influencia en el índice de flujo de carbono resultante. El acetileno tiene un proceso de descomposición prácticamente instantáneo en la superficie del metal, mientras que el propano es más lento porque debe primero descomponerse por pirólisis y generar acetileno, que es la fuente de carbono que adsorberá el metal. Como resultado, el acetileno es sensiblemente más rápido que el propano. Asimismo, el hecho de que el acetileno resultante de la pirólisis del propano sea la única fuente de carbono para el metal durante el proceso de tratamiento, puede también inducir a una cierta falta de homogeneidad en la cementación de la superficie de la carga.

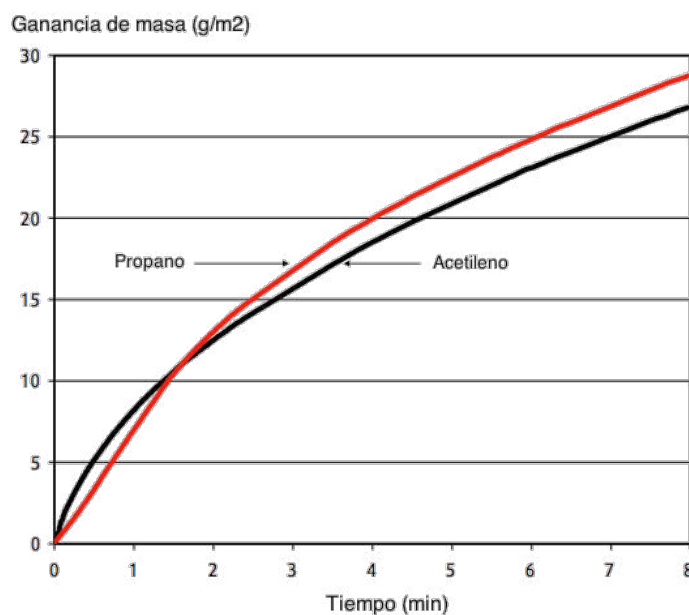


Figura A4- 14: Aumento de masa específica de una probeta de acero 20MnCr5 cementada con propano y con acetileno en las mismas condiciones de atmósfera. (Linde AG)

La pureza del gas empleado es otro factor que puede incrementar el rendimiento de carbono, puesto que afecta a la cantidad de carbono disponible por unidad de volumen.

La transferencia de carbono desde la atmósfera hacia la superficie del metal es lineal en el dominio situado por debajo de la saturación de la austenita. No obstante, también debe existir un

caudal de hidrocarburo suficiente, el cual depende de la temperatura y de la superficie de carga a tratar: cuando el caudal de gas es mayor que la superficie crítica, el flujo de carbono aumenta linealmente con el caudal de gas, y llegado a un punto, el flujo se estabiliza aunque el caudal siga aumentando.

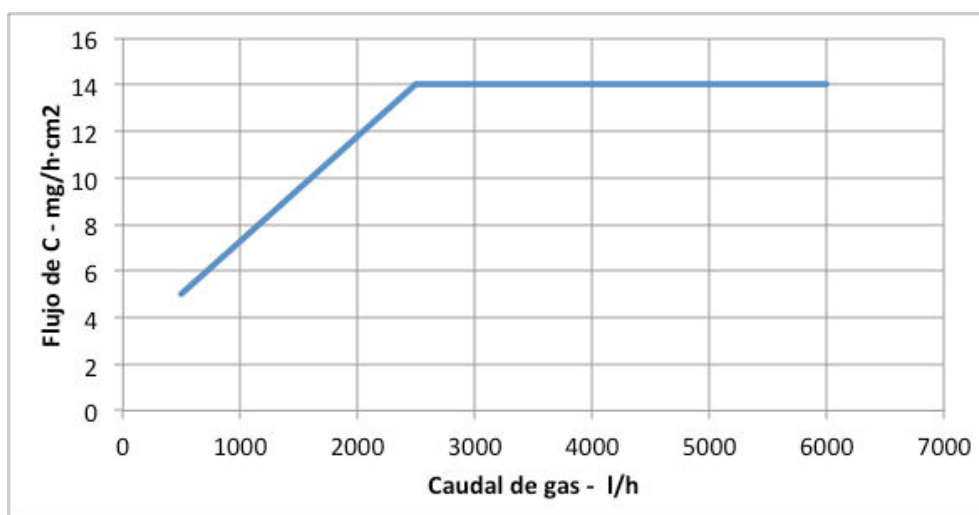


Figura A4- 15: Relación flujo de C - caudal de hidrocarburo. (ECM)

El caudal másico del gas de cementación no es un parámetro que pueda ser utilizado para controlar el contenido en carbono de la superficie metálica o la profundidad de capa, puesto que en caso de que se dosifique por debajo del valor crítico, puede provocar falta de homogeneidad entre las piezas: las piezas cuya superficie está más expuesta al gas se cementarán correctamente, pero componentes que estén ubicados en posiciones menos favorables presentarán resultados incorrectos. En el extremo opuesto, trabajar con un exceso de caudal podrá provocar la formación y deposición de residuos sólidos carbonosos en la instalación. El flujo efectivo de carbono también depende de la superficie de la carga: cuando la superficie es inferior a la superficie crítica, se constata que el flujo es constante. Sin embargo, cuando se alcanza el valor de superficie crítica, el flujo observado disminuye a medida que aumenta la superficie.

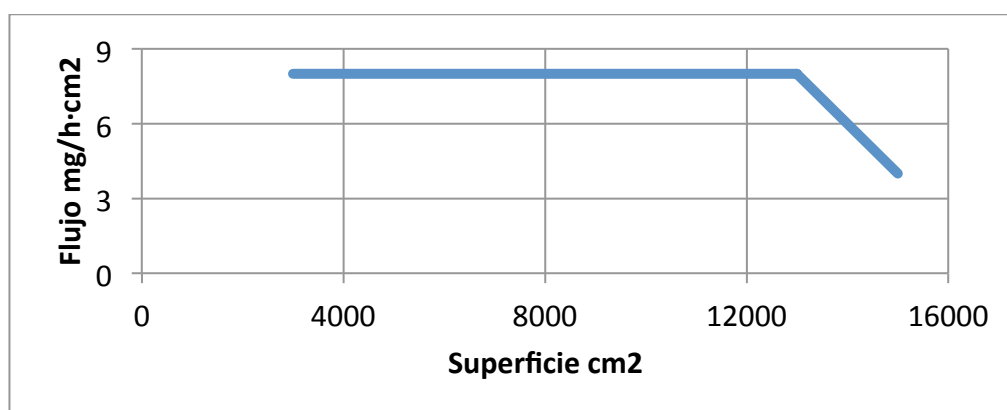


Figura A4- 16: Evolución del valor de flujo de carbono en función de la superficie de carga. (ECM)

Respecto a la presión del gas, este factor no tiene un efecto sobre los resultados obtenidos en el proceso de cementación. Por lo general, para alcanzar a cementar secciones de geometría difícil y cuyo acceso para los gases es más complicado, se ha mostrado más eficaz utilizar series de segmentos de pulsos y difusiones más cortas, lo que provoca continuos cambios en la presión de los gases en la atmósfera, lo que facilita la dinámica de los gases.

Adicionalmente, debe tenerse en cuenta que la presión de los gases afecta a los procesos de formación de hollín y las reacciones productos de polimerización.

Finalmente, encontramos el factor relativo al grado o aleación del acero que se está cementando. Los componentes de aleación del acero afectan al proceso fundamentalmente en tres aspectos:

- La cantidad de carbono máxima que pueden disolverse.
- La formación de carburos metálicos.
- La velocidad de difusión.

La cantidad de carbono que puede disolver el acero varía en función de la concentración de elementos de aleación sustitucionales. En general, cuanto mayor es la aleación del acero, menor es la cantidad de carbono que puede asimilar. Como resultado, la superficie se satura antes y pueden formarse carburos con mayor facilidad.

Otro aspecto relacionado con la aleación del acero hace referencia a los carburos que pueden precipitar durante el proceso de cementación. Elementos de aleación como Cr, Mo, V y W, que se añaden para acelerar la precipitación de carburos, formarán carburos que sólo disolverán a altas temperaturas.

Algunos elementos de aleación también presentan una fuerte influencia en la difusión de elementos intersticiales como el carbono. Muchos de los elementos de aleación que favorecen la formación de carburos, también reducen la velocidad de difusión. En consecuencia, la mayoría de los elementos de aleación reducen la profundidad de capa y aceleran la formación de carburos metálicos en la superficie. La aplicación de pulsos cortos de hidrocarburos evita en cierta medida la precipitación de carburos.

A4.2. TEMPLE EN GAS

A4. 26

El tratamiento térmico de endurecimiento de los aceros involucra procesos de calentamiento y de temple, siendo este último el más crítico en relación a los resultados finales obtenidos sobre el producto. El temple debe llevarse a cabo con un elevado control de la velocidad de enfriamiento, con objeto de obtener la estructura requerida. Sin embargo, una excesiva velocidad de enfriamiento puede dar lugar a problemas relacionados con una excesiva distorsión de los componentes, e incluso la aparición de grietas de temple.

La velocidad de enfriamiento debe por tanto ajustarse al tipo de material y a la forma y dimensiones de los componentes.

El uso de medios de temple líquidos siguen estando muy extendidos en los procesos de endurecimiento en los que se emplean hornos atmosféricos. La razón principal para ello estriba en que estos medios son capaces de proporcionar una mayor velocidad de enfriamiento respecto a los gases. La cantidad de moléculas por unidad de volumen es mayor en los líquidos, y por tanto la cantidad de calor que pueden retirar y transferir para una misma presión y velocidad de flujo. Como resultado, durante muchos años la opción del temple con gas ha sido el proceso más utilizado para el tratamiento térmico de los aceros de herramientas y los aceros de trabajo en frío y en caliente, siendo estos aceros de elevada aleación y por tanto de mayor templabilidad.

Sin embargo, con el desarrollo de las instalaciones con cámaras de temple en gas separadas de la cámara de calefacción, esta opción se ha convertido en una alternativa viable para reemplazar al aceite de temple por el gas a alta presión, utilizando nitrógeno o helio para el tratamiento de aceros endurecidos superficialmente y otros materiales de baja aleación. Este reemplazo se consigue debido a que el diseño de estas células de tratamiento permiten ser más eficientes en el temple, a partir del incremento de la presión de gas y de la velocidad de flujo del gas a través de la carga.

Las presiones se han incrementado desde 5 bar hasta valores próximos a 40 bar, y las velocidades de gas desde 5 m/s hasta 100 m/s.

El éxito de esta tecnología está basada en sus ventajas medioambientales y en su eficiencia comercial. La opción de temple en gas es una alternativa medioambientalmente ventajosa respecto al tradicional temple en aceite. Los gases de temple nitrógeno o helio son inertes y no comportan ningún riesgo ecológico. Asimismo, presentan la ventaja de que no dejan residuos sobre las piezas templadas o en el interior de la cámara de tratamiento. Como resultado, se reducen las inversiones en equipamientos tales como lavadoras y sistemas de extinción de incendios, lo que redundará en una

reducción de los costes operativos. Cuando se utiliza helio como gas de temple, suele instalarse un sistema de reciclaje del gas, lo que permite repetir reutilizar indefinidamente el gas.

En las instalaciones ICBP del fabricante de hornos ECM, el temple en gas se efectúa en una célula específica, hacia la que las piezas de la carga son rápidamente transferidas desde las células de calentamiento después del proceso de cementación. Las piezas son entonces enfriadas mediante la inyección del gas a presiones de hasta 20 bar, el cual se hace recircular mediante dos turbinas colocadas en la parte superior de la célula. Cuando las piezas salen de la célula de temple, éstas están dispuestas ya para la siguiente operación, que generalmente suele ser el revenido.



Figura A4- 17: Instalación ModulTherm, del fabricante ALD.

Otro de los beneficios destacables de esta tecnología es la reducción en las deformaciones o distorsiones dimensionales inducidas por el proceso de temple respecto al temple en aceite, con un alto grado de reproducibilidad. De esta forma, el temple en aceite puede ser reservado específicamente para los componentes de mayor masa, en cuyo caso, el temple en gas puede no proporcionar la suficiente velocidad de enfriamiento.

Cuanto menor es la templabilidad de un acero, mayor es la velocidad de temple requerida para endurecerlo. Por lo general, una elevada templabilidad está asociada con un alto contenido en elementos de aleación. Sin embargo, en la mayoría de los componentes cementados y templados utilizados para la construcción de componentes de la industria de automoción, el grado de aleación debe minimizarse para contener los costes del material. En consecuencia, suele tenderse a buscar la mayor velocidad de temple en el medio empleado.

La velocidad del temple en gas está controlada básicamente por tres factores principales:

- Las propiedades físicas del gas.
- La presión de gas que se introduce en la célula de temple.
- La velocidad de paso del gas a través de las piezas de la carga.

La presión está básicamente limitada por los costes: presiones de temple por encima de 20 bar generalmente no resultan económicas. Por su parte, la velocidad del gas está condicionada por el diseño y concepción de la instalación, aún y cuando los fabricantes de hornos intentan incrementarla en la medida de lo tecnológicamente posible.

Las ventajas principales del temple en gas pueden resumirse en los siguientes aspectos:

- Reducción de la deformación por endurecimiento.
- Intensidad de temple ajustable a partir del control de la presión y velocidad del gas.
- Flexibilidad del proceso.
- Condiciones de trabajo más limpias y no tóxicas.
- Integración en las líneas de manufactura.
- Mayor reproducibilidad de los resultados de temple.
- Piezas más limpias y secas, sin necesidad de introducir etapas de lavado.
- Control del proceso más simple.

A4.2.1. GASES DE TEMPLE

El tipo de gas utilizado condiciona de forma directa la velocidad de enfriamiento resultante. En tanto que aumentando las velocidades de enfriamiento se pueden conseguir templar eficientemente componentes con secciones mayores, el objetivo de numerosos estudios radica en establecer condiciones que maximicen el coeficiente de transferencia térmica de los medios gaseosos. Este coeficiente depende fundamentalmente de parámetros como la conductividad térmica, la viscosidad, el calor específico y la densidad de los gases.

En referencia a las características y propiedades de los gases, la velocidad de transferencia de calor por convección está regida por las propiedades termo físicas de los gases, por la geometría del cuerpo, por la velocidad, la presión y la turbulencia del gas.

Los gases de aplicación más habitual son argón, nitrógeno, helio e hidrógeno. También es posible utilizar mezclas de gases, tales como nitrógeno y hidrógeno, o helio y dióxido de carbono, lo que permite aún aumentar en mayor medida la capacidad de enfriamiento del medio respecto al uso de un único gas.

Propiedad		Argón	Nitrógeno	Helio	Hidrógeno
Densidad	kg/cm ³	1,67	1,17	0,17	0,08
Calor específico	kJ/kg K	0,52	1,04	5,19	14,30
Conductividad térmica	W/m ² K	0,017	0,026	0,154	0,191
Viscosidad dinámica	N s/m ²	23·10 ⁻⁶	18·10 ⁻⁶	20·10 ⁻⁶	9·10 ⁻⁶
Viscosidad cinemática	m ² /s	0,14	0,15·10 ⁻⁴	1,19·10 ⁻⁴	1,06·10 ⁻⁴

Las propiedades físicas de los gases se han tabulado para una temperatura de 15°C y 1 bar. Sin embargo, éstas varían con la temperatura y especialmente con la presión.

Durante muchos años, el gas de referencia en la industria ha sido el nitrógeno, debido a que se trata de un gas económico y ampliamente disponible. Basándonos en cálculos teóricos termodinámicos, los resultados indican que el hidrógeno debe ser un 50% más rápido en el enfriamiento del metal que el nitrógeno, y un 17% más rápido que el helio. (Hill)

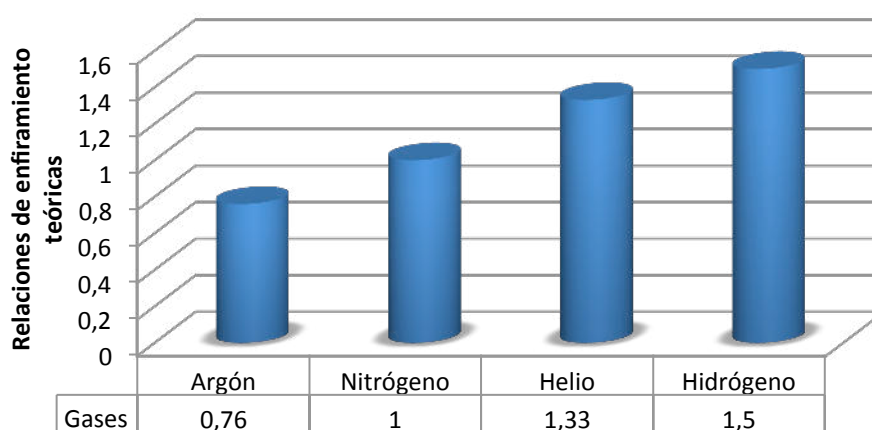


Figura A4- 18: Gráfico comparativo de la velocidad de enfriamiento relativa de diferentes medios gaseosos de temple. (Air Products)

El nitrógeno, con presiones de entre 10 y 20 bar, está aconsejado para un gran número de aceros de baja aleación, especialmente cuando las secciones de las piezas no son grandes (hasta secciones de Ø30 mm).

Para un gas determinado, el coeficiente de transferencia térmica aumenta con la presión del gas. Los gases con moléculas más pequeñas y ligeras presentan mayor conductividad térmica debido a que pueden desplazarse de forma más rápida y distancias mayores sin colisionar. Por ello, las moléculas de hidrógeno y de helio muestran mayores coeficientes de transferencia térmica en comparación con los gases más pesados nitrógeno y argón.

El uso de gases más ligeros también introduce varias ventajas relevantes: por una parte reduce la potencia y el consumo de los motores de las turbinas utilizados para recircular el gas en la célula, lo que posibilita alcanzar mayores presiones manteniendo un diseño dado de instalación, y por otra parte permite reducir los consumos en energía eléctrica. También permite, mediante el uso de gases más ligeros, aumentar la velocidad de circulación del gas, lo que mejora la transferencia de calor resultante.

El uso de argón está generalmente limitado a aquellas aplicaciones en las que se utilizan aceros que son sensibles a la nitruración, para los cuales se desaconseja el uso del nitrógeno. También se emplea argón en aquellos casos en que la superficie de los componentes pueda ser reactiva con otros gases.

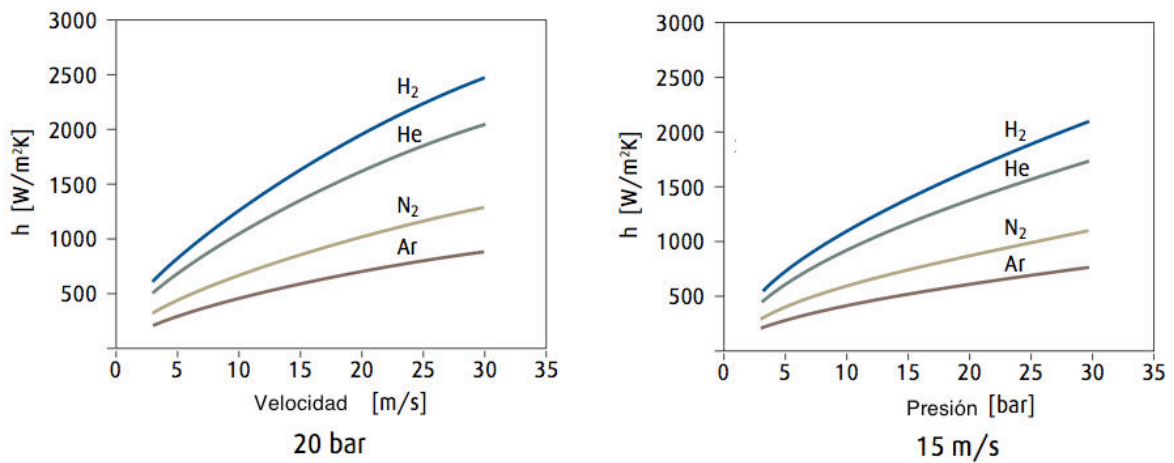


Figura A4- 19: Efecto de la velocidad y la presión de gas en el coeficiente de transferencia térmica. Temple de un cilindro de $\varnothing 12,5mm$. (Air Products)

Cuando son requeridas mayores velocidades de enfriamiento que las que ofrece el nitrógeno, suele utilizarse helio. Sin embargo, este gas es más caro que el nitrógeno y las reservas de helio son finitas. En este caso, la instalación de temple en gas requiere también de un dispositivo que permita la recuperación del gas para su reutilización en posteriores ciclos de temple. No obstante, incluso en el mejor de los casos, los costes asociados a la utilización del helio se disparan respecto a los costes resultantes del empleo de nitrógeno.

Respecto al hidrógeno como gas de temple, éste es el que proporciona velocidades de enfriamiento más rápidas, en cierta medida próximas a un temple con aceite, siendo además un gas más atractivo que el helio en referencia a los costes asociados a su utilización. No obstante, debido a su elevada inflamabilidad cuando se combina con el oxígeno, deben considerarse rigurosas medidas de seguridad en su utilización, lo que limita finalmente su utilización práctica.

Las mezclas de gases pueden incrementar sensiblemente el coeficiente de transferencia térmica respecto al empleo de gases puros: generalmente esta mejora se consigue a partir de mezclas de N_2+He ,

N_2+H_2 o mezclas de CO_2+He . A modo de ejemplo, la mezcla de gases que presentan una alta conductividad térmica (He) con gases más densos (CO_2) permiten alcanzar un balance óptimo en el coeficiente h de la mezcla resultante (40%He-60% CO_2). Sobre la base de los estudios y simulaciones teóricas, el empleo de esta mezcla de He- CO_2 proporciona un medio de temple que incrementa la transferencia de calor en aproximadamente un 80%. (F.Chaffotte)

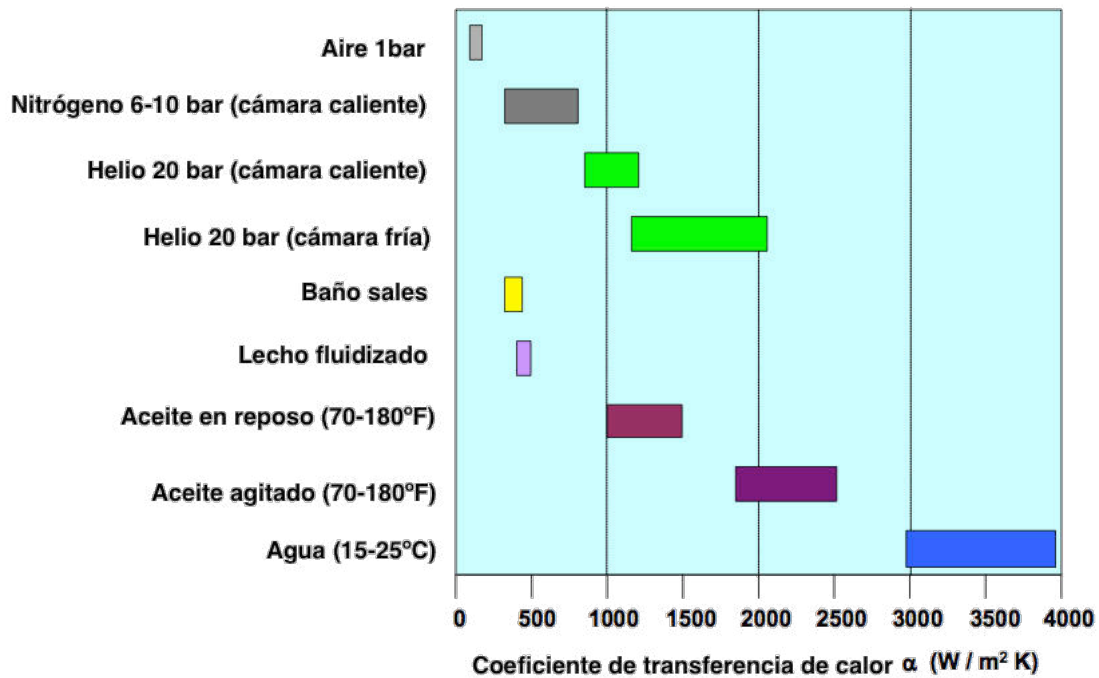


Figura A4- 20: Coeficiente de transferencia térmica para distintos medios de temple. (Löser)

A4.2.2. MODELOS DE ENFRIAMIENTO CON ACEITES Y GASES

Existen diferencias significativas en el modelo de cinética de enfriamiento que resulta a partir del temple gaseoso o el temple en aceite. Cuando se temple en aceite o en medio líquido, el enfriamiento ocurre en tres etapas o fases:

1. Fase vapor:

Inicialmente, la superficie metálica está tan caliente que el líquido que envuelve la pieza se vaporiza instantáneamente por el intercambio térmico, con lo que la superficie se envuelve con una capa gaseosa que la aísla térmicamente. Es importante que la duración de esta fase no sea excesiva, con objeto de evitar la aparición de fases ferríticas o perlíticas en la microestructura final. Diversos factores determinan la

longitud de la fase vapor, tales como el tipo de aceite, su calor latente de evaporación, la geometría del componente y el grado de empaquetamiento de la carga.

2. Fase de ebullición:

La fase vapor colapsa después de un corto espacio de tiempo. Cuando la temperatura de la superficie baja suficientemente el vapor es sustituido por líquido, el cual entra en ebullición debido a la temperatura del metal. Es la etapa en la que se obtiene la mayor velocidad de enfriamiento del componente. Para que esta etapa del temple sea eficiente, la velocidad de enfriamiento debe ser mayor en el rango de temperatura de la nariz de las fases ferrita y perlita del diagrama de enfriamiento continuo del acero.

3. Fase de convección:

Finalmente, la temperatura de la superficie es suficientemente baja para que el líquido deje de hervir y el enfriamiento se lleva a cabo por convección, hasta que la temperatura de la pieza se iguala con la temperatura del medio líquido. Durante esta etapa, la velocidad de recirculación del aceite y su temperatura son los factores principales que determinan la velocidad del enfriamiento.

Las etapas individuales se caracterizan por diferentes coeficientes de transferencia térmica, lo que comporta la aparición de grandes gradientes de temperatura en la pieza templada, provocándole distorsión dimensional. Normalmente las tres fases coexisten durante un intervalo de tiempo, hasta que únicamente perdura la fase de convección.

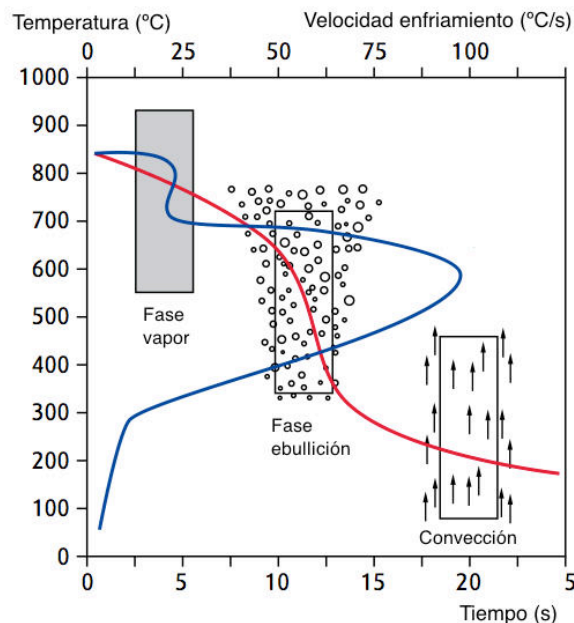


Figura A4- 21: Curva de enfriamiento típica de aceites de temple. (Linde AG)

Por su parte, el gas se caracteriza por presentar una única fase de enfriamiento durante todo el proceso de temple (fase de convección). Como resultado, la transferencia de calor es más homogénea y el riesgo de distorsiones se reduce. Durante esta fase, la velocidad del flujo, la presión y la temperatura del gas son los factores principales que van a determinar la velocidad de enfriamiento obtenida. También tiene lugar enfriamiento por radiación hacia los elementos constructivos de la célula de temple, si bien en la práctica este factor es poco relevante. Como puede observarse en la figura, el aceite suele ser mucho más eficiente en el enfriamiento de la carga que los gases. Asimismo, la temperatura final de las piezas es más baja con los gases que con los aceites.

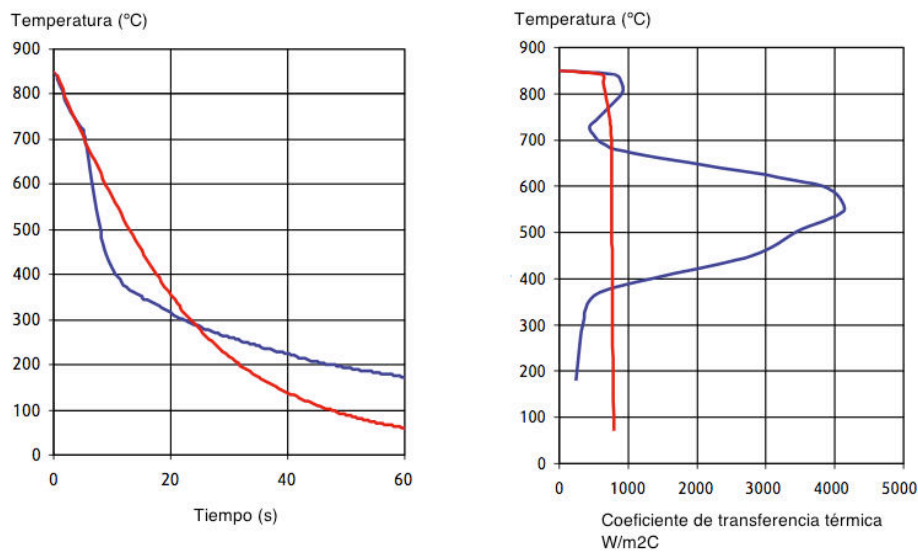


Figura A4- 22: Comparativa de curvas de enfriamiento para helio (rojo) y aceites (azul). (Linde AG)

La siguiente figura muestra de forma esquemática el proceso de temple en aceite y temple en gas de un cilindro de acero. Si congelamos el proceso de temple en aceite en el instante $t=10$ s, se observa como coexisten las tres fases del temple en aceite: esto provoca que en la superficie del cilindro existan zonas con un importante gradiente térmico, lo que provoca la aparición de tensiones que inducen distorsiones dimensionales en la pieza. Adicionalmente, el hecho de que la transformación martensítica no se inicie de forma uniforme, también es causa de tensiones adicionales.

Por el contrario, el temple en gas es monofásico y, después de un breve disminución de la temperatura, proporciona un coeficiente de transferencia de calor prácticamente constante, el cual dependerá del tipo de gas que se esté utilizando, de la presión y la velocidad del gas, así como de la disposición y geometría de los componentes. Los gradientes térmicos que se generan son comparativamente mucho menores, por lo que este tipo de temple provoca tensiones más homogéneas y una menor distorsión dimensional.

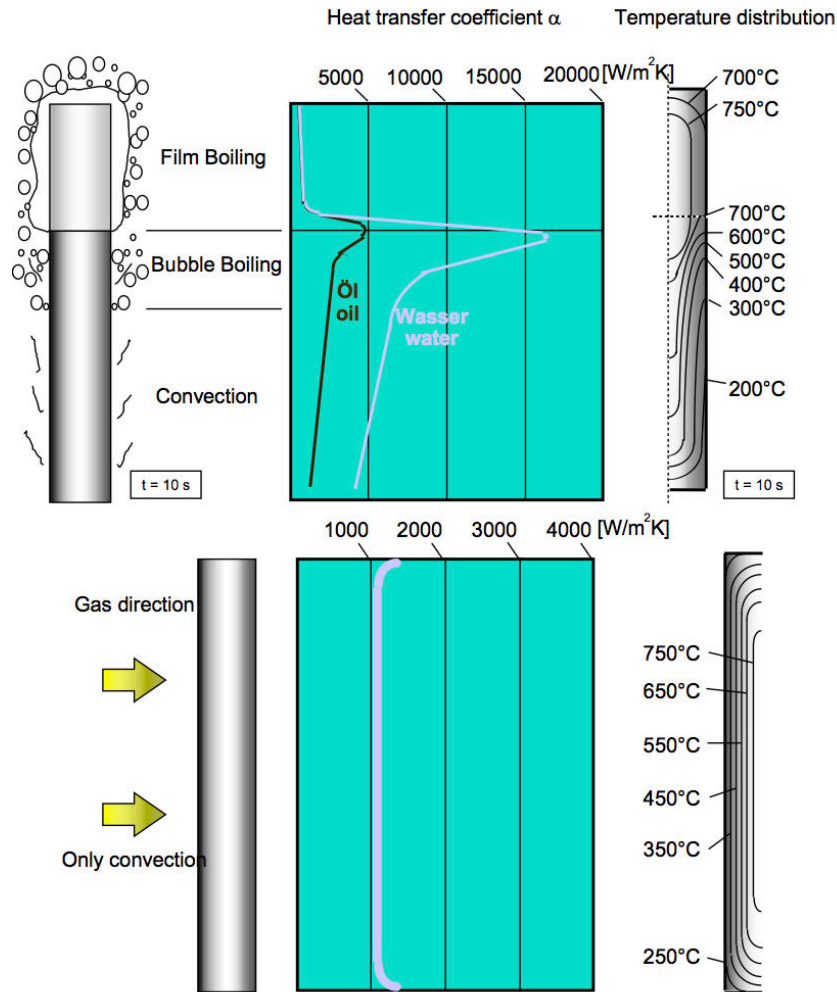


Figura A4- 23: Esquema de la transferencia de calor y el gradiente de temperatura en un temple por inmersión –superior- y en un temple con gas a alta presión –abajo-. (Löser)

Tal y como representa la figura siguiente, en el temple en gas el intercambio térmico tiene lugar participando básicamente 4 mecanismos de transferencia: (F.Chaffotte)

1. Conducción térmica interna en la pieza de acero: el calor extraído de la superficie metálica es transferido desde su núcleo más caliente mediante difusión en el sólido.
2. Convección forzada. El gas es puesto en movimiento a través de las hélices de las turbinas, transfiriendo el calor desde la carga hasta los intercambiadores de calor de la instalación. La principal forma de optimizar este mecanismo convectivo es aumentando la velocidad de recirculación del gas, si bien aquí existen limitaciones tecnológicas y constructivas.
3. Radiación: la radiación infrarroja emitida por las piezas que se encuentran a alta temperatura son absorbidas por los elementos y las paredes de la célula que se encuentran a temperatura más fría, lo que contribuye en cierta medida al enfriamiento de la carga. Sin embargo, este efecto se dará fundamentalmente en las piezas que

están localizadas en la periferia de la carga, puesto que las piezas internas están a su vez rodeadas de otras piezas calientes, por lo que no se verán enfriadas por mecanismo de radiación. Con la excepción del CO₂, los gases de temple generalmente utilizados son transparentes a la radiación infrarroja, y por tanto no intercambian calor por radiación.

4. Transferencia de calor conductiva-convectiva en la superficie de las piezas: debido a que cerca de la superficie de las piezas en la capa límite la velocidad del gas es relativamente lenta, la importancia de la transferencia conductiva de calor no debe ignorarse. Conducción y convección tienen lugar de forma conjunta en la superficie de las piezas. En la mayoría de casos, cuando la transferencia por radiación es negligible, este mecanismo de transferencia térmica es el principal responsable del enfriamiento de las piezas. Y por consiguiente, el correspondiente flujo de calor es el principal parámetro que debe mejorarse para aumentar las velocidades de enfriamiento.

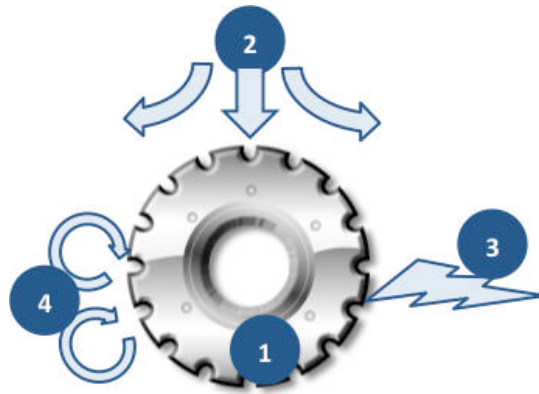


Figura A4- 24: Modos de transferencia de calor que participan en el temple en gas.

La influencia que la presión y la velocidad del gas tiene en el coeficiente de transferencia térmica viene determinado por la ecuación siguiente:

$$h = C \cdot p^m \cdot v^n$$

h= coeficiente de transferencia térmica, W/m²°C

p= presión de gas, bar

v= velocidad de gas, m/s

C, m, n= constantes, dependientes del diseño de la cámara, configuración de la carga y geometría de los componentes, entre otros factores.

La velocidad del gas está controlada por la velocidad y diseño de las hélices de las turbinas. Mayores velocidades de gas proporcionan mayor cantidad de moléculas de gas por unidad de tiempo en contacto con la superficie del componente, aumentando la velocidad de transferencia de calor.

De forma similar, aumentando la presión de gas se aumenta el coeficiente de transferencia térmica resultante.

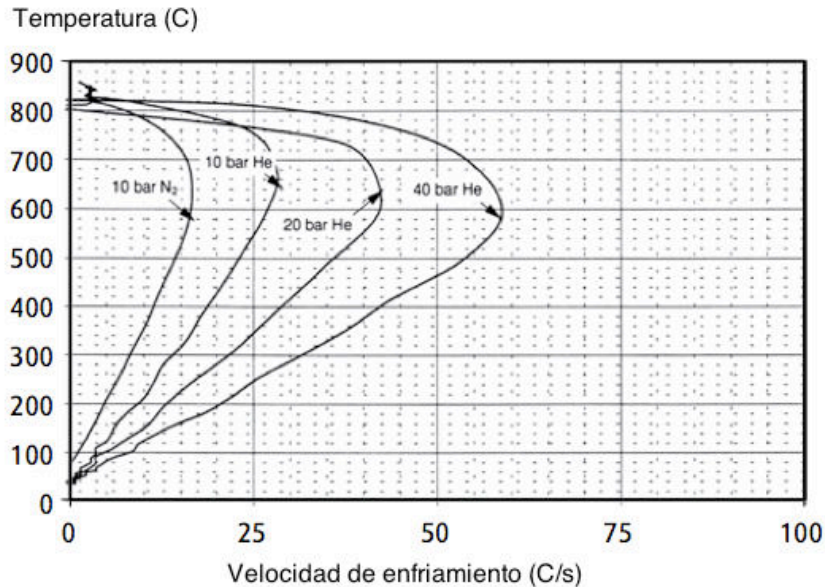


Figura A4- 25: Curvas de enfriamiento para distintas presiones de N2 y He. (Linde AG)

A4.2.3. EQUIPAMIENTO DE TEMPLE EN GAS

El desarrollo de los procesos de temple en gas se han acelerado particularmente durante las últimas décadas, a partir de los años 90, con la introducción de gases más ligeros, como el helio y el hidrógeno, y con el incremento de las presiones de trabajo: esto permitió incrementar los coeficientes de transferencia de calor de los gases de temple. En la práctica aún en la actualidad el límite se sitúa alrededor de los 20 bar por razones técnicas y económicas. De esta forma se pueden templar correctamente aceros de cementación, aceros de temple en piezas de grandes dimensiones o aceros de baja aleación.

Uno de los objetivos de los fabricantes de instalaciones consiste en desarrollar cámaras frías de temple cuyo diseño del flujo interior de gases permita incrementar los coeficientes de transferencia de calor sin necesidad de incrementar la presión del gas.

Como se ha indicado, en los procesos de temple en gas, las piezas son enfriadas mediante el flujo de un gas presurizado a alta velocidad. La eficiencia del temple en gas depende absolutamente de la eficiencia de la transferencia de calor que tiene lugar entre el gas y las piezas. En este sentido, la

configuración del flujo de gas tiene una influencia de primer orden en el mecanismo de intercambio de calor.

Las instalaciones de vacío convencionales pueden ser utilizadas para implementar la cementación en baja presión. Sin embargo, el uso de acero para los elementos constructivos de la cámara de cementación y de los elementos de calefacción deben evitarse, debido a que introducen una gran superficie catalítica durante el proceso de cementación. Esto se resuelve utilizando una construcción interior basada en materiales cerámicos o en grafito.

Las instalaciones más recientes utilizan grafito para construir la cámara y los elementos de calefacción (*casing*), los cuales no interferirán con el proceso de cementación catalizando la reacción del gas de proceso. No obstante, el uso de grafito implica que debe mantenerse muy baja la presión parcial de oxígeno para evitar su deterioro y destrucción.

Las instalaciones actuales de cementación en baja presión y temple en gas se clasifican de acuerdo al esquema constructivo:

- Hornos de vacío de cámara única.
- Hornos de vacío de doble cámara.
- Hornos de vacío multicámara.

Las instalaciones mono cámara presentan la desventaja de que tanto el calentamiento como el temple se llevan a cabo en una misma cámara. Por tanto, el diseño de la cámara es en la práctica un compromiso entre los requerimientos asociados a los sistemas de una cámara de calefacción y los que impone una cámara de temple. Durante el proceso de temple, todos los elementos constructivos internos deben ser enfriados junto con la carga. Adicionalmente, en estas instalaciones existirá un mayor distancia entre la carga y las paredes de la cámara, por lo que una parte del gas de temple tendrá también oportunidad de circular rodeando la carga, en lugar de pasar a través de la misma. Esto, en la práctica puede imponer dificultades o limitaciones en la eficiencia del temple resultante.

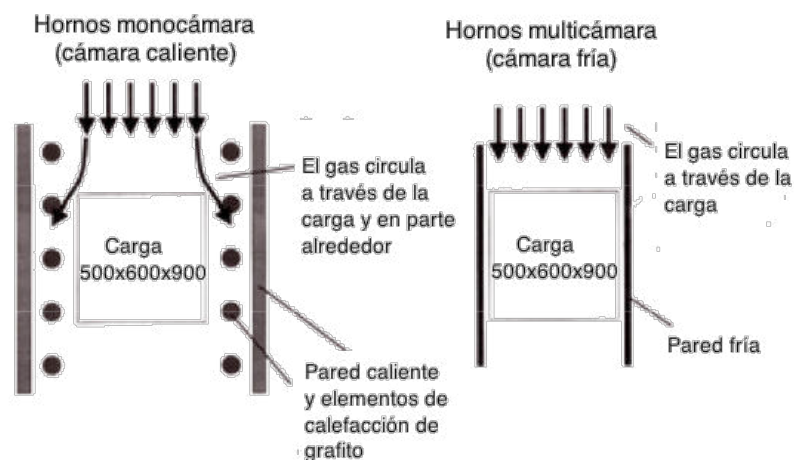


Figura A4- 26: Diferencias de flujo de gas entre monocámara y multicámara. (Linde AG)

Es aconsejable que la cámara de temple se diseñe de forma que la distancia entre las paredes y la carga sea lo más pequeña posible, con objeto de forzar al gas a circular a través de las piezas y también acelerar el llenado de la cámara. Es habitual que esta distancia sea de entre 30 a 50 mm.

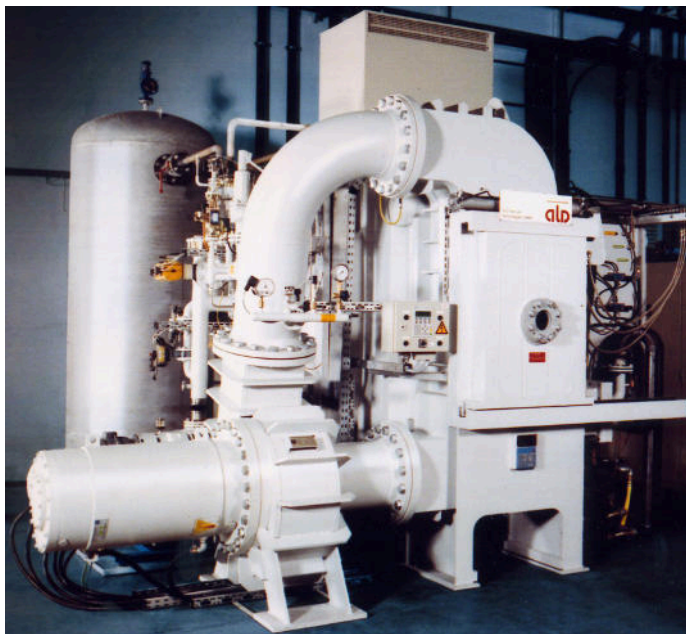


Figura A4- 27: Horno ALD monocámara tipo VZKQ multipropósito. (Löser)

Otro aspecto a considerar es que las dimensiones del conducto de admisión del gas tenga las mismas dimensiones que la sección de la carga, también con el objeto de conseguir un temple lo más homogéneo posible en la carga.

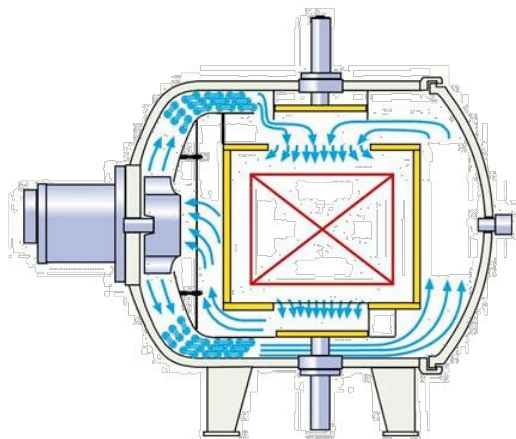


Figura A4- 28: Horno monocámara Ipsen tipo VFCK-224. (Ipsen International GmbH)

Cuando se requieren mayores velocidades de enfriamiento, y por tanto mayores coeficientes de transferencia térmica en el temple, el horno debe construirse con una cámara de temple en gas de pared fría, lo que implica que esta cámara de temple debe estar separada de la cámara de calefacción.

La configuración más sencilla de estos hornos es la de doble cámara, si bien en la práctica encontramos hornos multicámara que son instalaciones modulares con unidades con funciones especializadas.

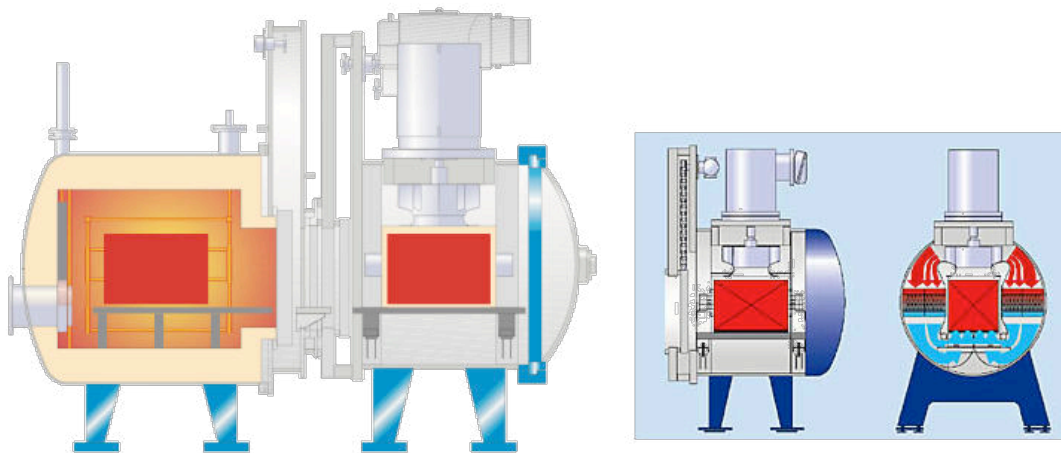


Figura A4- 29: Esquema de un horno de vacío Ipsen tipo RVHT-GQP de doble cámara. (Ipsen International GmbH)

La construcción de la cámara de temple separada de la cámara de calefacción permite optimizar las condiciones de flujo de gas, y las capacidades de enfriamiento pueden aumentar del orden de 30 a 40% debido a la ausencia de elementos de calefacción y aislamientos que deban ser enfriados. Estas cámaras también permiten aumentar la velocidad de circulación del gas, que suele situarse en el rango de 10 a 20 m/s

Por tanto, la tecnología de células de temple en gas contempla diversas soluciones constructivas, con objeto de adaptarse a los requerimientos del componente que se va a tratar: sin embargo, el estándar considera el temple en células dedicadas de cámara fría y con flujos de gas a alta presión circulando verticalmente (el sentido del flujo de gas suele ser desde arriba hacia abajo a través de la carga, si bien encontramos también configuraciones que invierten este flujo). La localización de las turbinas que recirculan el gas suele ubicarse en la zona superior de la célula, si bien también pueden encontrarse ubicados en los laterales de la misma.

También se sitúa dentro de la célula de temple el dispositivo refrigerador del gas de temple, consistiendo éste en uno o varios intercambiadores de calor que utilizan generalmente agua como fluido refrigerante.

Cuando una carga es templada con gas que circula en una determinada dirección el gas se calienta a medida que intercambia calor con la carga, de forma que las piezas de un extremo de la carga pueden no templar con la misma velocidad que las del otro extremo.

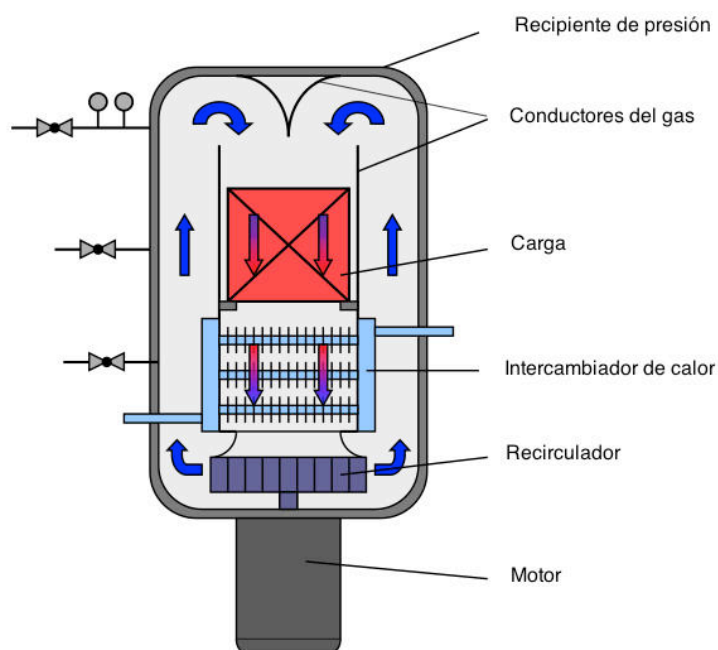


Figura A4- 30: Esquema constructivo de una célula de temple en gas. (Löser)

Para minimizar este problema y obtener resultados más uniformes, el constructor ALD ha diseñado una cámara de temple en gas de pared fría equipada con un dispositivo de válvulas y cilindros neumáticos que permiten invertir el sentido de circulación del gas a través de la carga, tal y como se muestra en el siguiente esquema. El sentido de circulación del gas puede invertirse cada 10-20 segundos, proporcionando un temple más homogéneo.

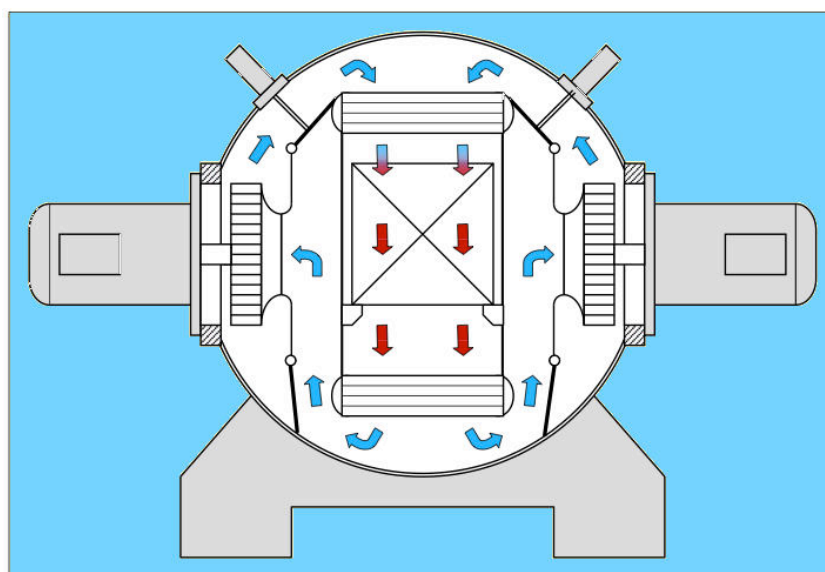


Figura A4- 31: Concepto de temple en gas de flujo reversible. ModulTherm - ALD. (Löser)

Las instalaciones multicámara se aplican cuando se requieren procesos con una elevada productividad y con un rango de producción y flexibilidad elevados. Suelen clasificarse en hornos continuos en línea y hornos multicámara conectados, si bien el segundo grupo se está imponiendo sobre el primero, pues presentan ventajas relevantes respecto a los tradicionales hornos continuos en línea.

Las instalaciones multicámara están formadas por una cantidad variable de células de calentamiento y una o dos células de temple. Todas ellas están bien acopladas a un túnel estanco en el interior del cual se sitúa un transportador, bien interconectadas mediante una unidad de transporte externa auxiliar que circula sobre raíles. En esta última configuración, la carga es trasladada entre las diferentes células (carga/descarga, proceso y temple) mediante un transportador calefactado y en vacío. De forma que cuando la carga ha concluido su etapa de cementación, el transportador se conecta con la célula de tratamiento y descarga la carga para trasladarla a la célula de temple, todo ello en condiciones de vacío para evitar su oxidación.

En función del número de células de tratamiento de la instalación, puede requerirse una segunda unidad de transporte.

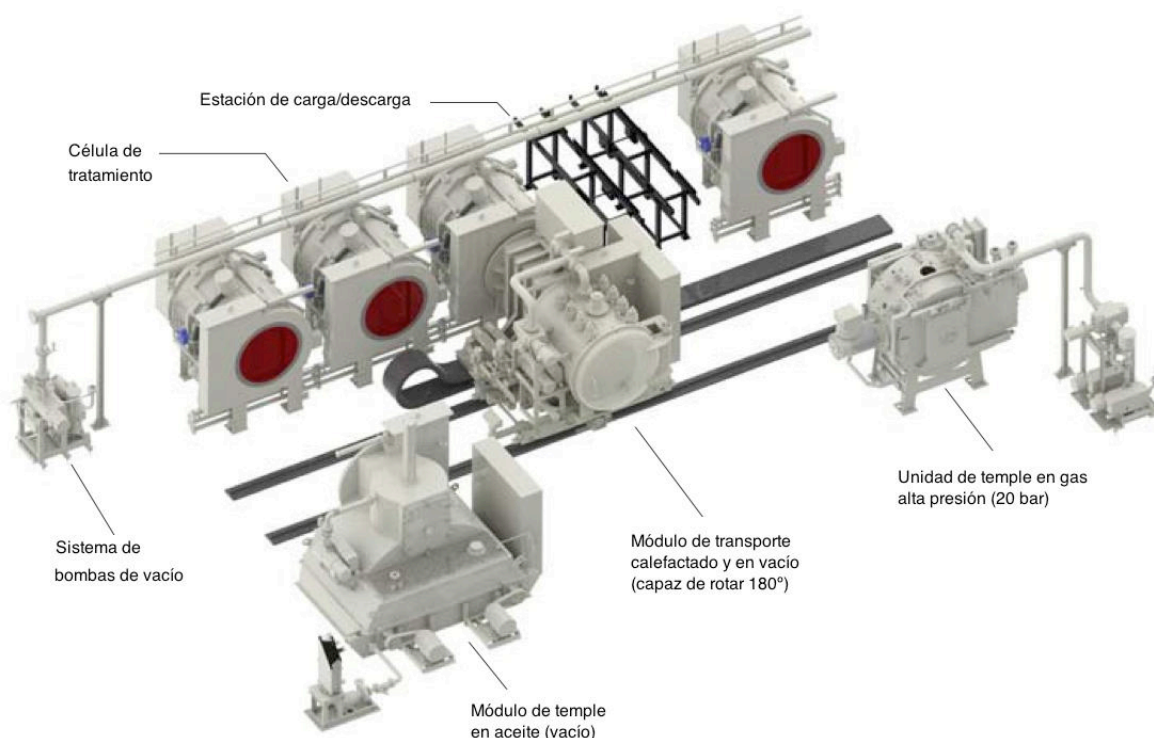


Figura A4- 32: Esquema de una instalación modular tipo Modultherm, de ALD. (ALD-Holcroft)

ECM, por su parte, construye sus instalaciones de cementación en baja presión acoplando las unidades o células de tratamiento sobre ambos lados de una unidad central en forma de túnel. En el

interior del túnel ubica una unidad que traslada las cargas en las diferentes etapas del proceso de tratamiento.

Todo el sistema es mantenido en vacío, y a diferencia del concepto presentado anteriormente, durante el traslado entre la célula de cementación y la célula de temple, la carga no se mantiene calefactada, por lo que es importante que esta operación se lleve a cabo con rapidez para minimizar la eventual pérdida de temperatura de la carga.

A4. 42

La carga y descarga de la instalación se realiza de forma automática a través de una célula específica acoplada al túnel de la instalación.

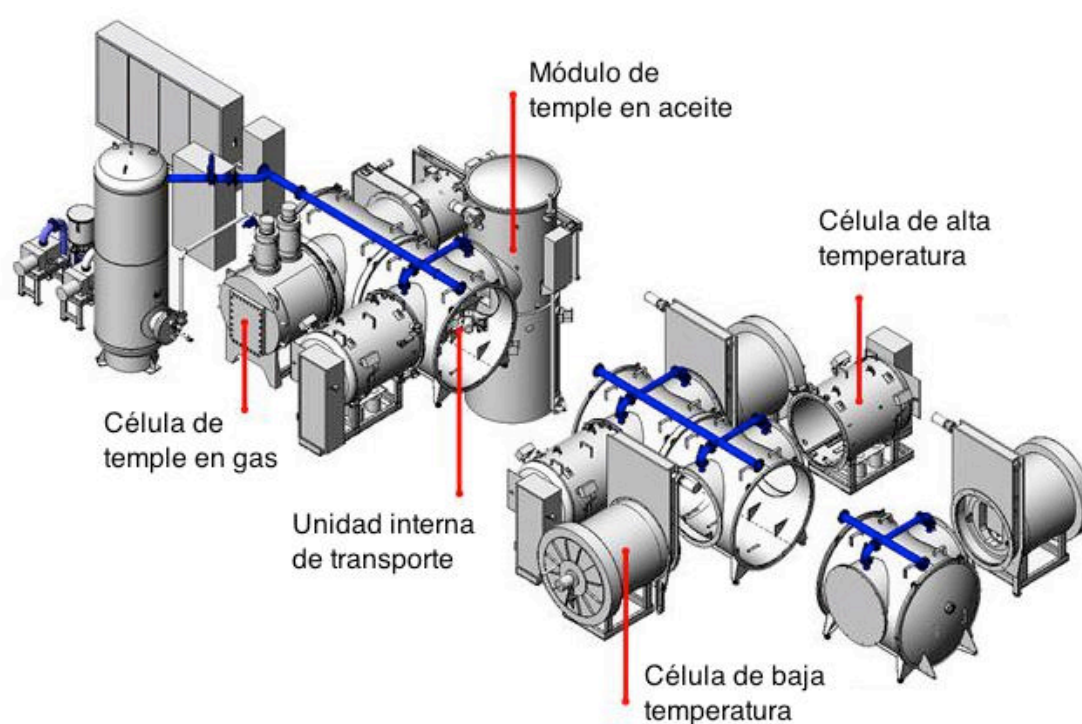


Figura A4- 33: Esquema modular de una instalación tipo ICBP. (ICBP Fours)

La cantidad de células o módulos que se pueden conectar al túnel es variable: desde una en su configuración mínima, hasta 10 a 12 en las instalaciones de mayor tamaño. Asimismo, estas instalaciones modulares permiten también progresivas ampliaciones en diferentes etapas.

A4.2.4. CONTROL DE LA DISTORSIÓN DURANTE EL TEMPLE EN GAS

En lo que se refiere a las distorsiones dimensionales de los componentes asociadas al proceso de temple, deben considerarse los siguientes aspectos: la transferencia de calor durante el temple es el mecanismo que controla la transformación metalúrgica del material, y tiene lugar según los siguientes mecanismos; por una parte la transferencia de calor que ocurre dentro de la propia pieza mediante conducción térmica; y por otra a partir del intercambio térmico entre la superficie de la pieza y el gas de temple, interviniendo en este caso transferencia de calor mediante conducción, convección y radiación. En la práctica todos estos procesos están íntimamente relacionados, tal y como se representa en el esquema siguiente:

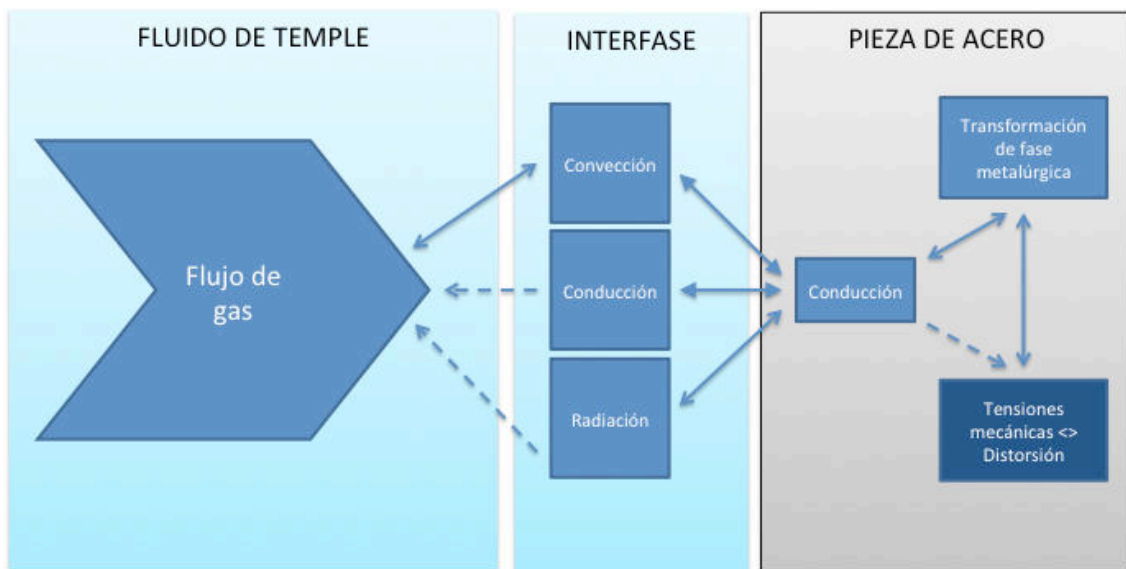
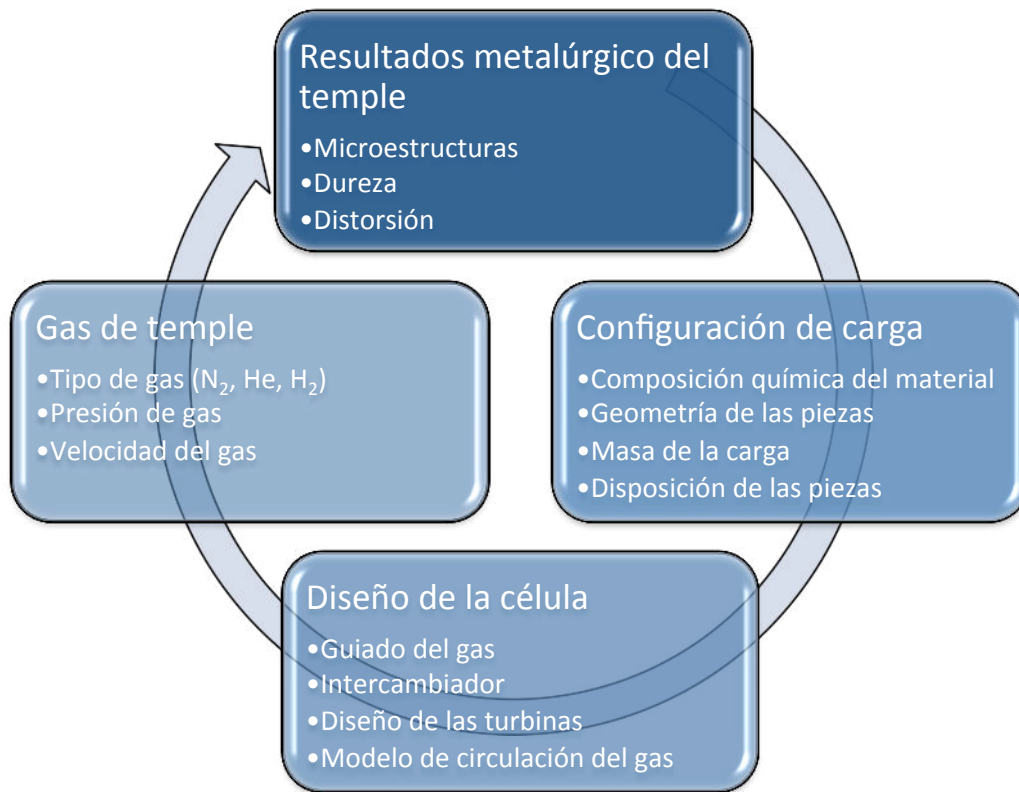


Figura A4- 34: Relación entre los fenómenos físicos involucrados en el temple gaseoso. (G.Pellegrino)

La transferencia de calor entre las piezas y el gas depende del flujo turbulento de gas, las propiedades termo físicas del gas y de la temperatura de la superficie de las piezas. Al mismo tiempo, este intercambio térmico provoca un incremento de la temperatura del gas, lo que afecta al propio flujo de gas. La disminución en la temperatura del acero induce la transformación microestructural: la microestructura resultante está asociada a la velocidad de enfriamiento alcanzada dentro de la pieza y a la composición química del acero.

La transformación de fases también afecta a la evolución de la temperatura interna de la pieza. Efectivamente, propiedades físicas como conductividad térmica difieren en gran medida entre distintas fases. Adicionalmente, la transformación de fases que tiene lugar durante el temple es exotérmica, lo que retrasa el enfriamiento de la pieza.

Por otra parte, la modificación de la microestructura disminuye sensiblemente la densidad del acero (provocando su expansión): este efecto, combinado con la contracción térmica, genera distorsión y tensiones mecánicas. Al mismo tiempo, las tensiones mecánicas afectan también a la transformación de fase.



A modo de resumen, el anterior esquema presenta de forma sintética los parámetros principales que intervienen en los resultados finales que se obtienen en el temple en gas.

Los gradientes de temperatura que aparecen en las piezas durante el proceso de temple provocan tensiones, transformaciones de fase desiguales y en consecuencia distorsiones y diferencias de durezas. Por lo tanto es importante minimizar la aparición de estos gradientes. Esto puede conseguirse mediante la reducción de la presión o a partir de la reducción de la velocidad del gas.

La tecnología de temple en gas actual permite también introducir variantes que han demostrado introducir no sólo una significativa reducción en el nivel de distorsión dimensional, sino incluso mejorar el comportamiento en fatiga de los componentes tratados respecto a un proceso de temple tradicional.

Este es el caso del proceso denominado ECM StepGQ o temple gaseoso interrumpido, desarrollado por ECM Technologies (Jean Jaques Since): la versatilidad del proceso de temple en gas admite efectuar el proceso de temple en etapas, lo que permite que el temple se lleve a cabo siguiendo el diagrama de enfriamiento continuo del acero en la medida de lo posible.

En el temple con gas, la intensidad del proceso puede controlarse a partir de dos parámetros: la presión y la velocidad del gas. Esta flexibilidad proporciona opciones de gestión de la etapa de temple en componentes sujetos a elevadas distorsiones dimensionales. Aplicando un proceso de temple en etapas se consigue una reducción significativa en el nivel de deformación del componente. Tal y como se esquematiza en la figura siguiente, el procedimiento persigue fundamentalmente reducir los gradientes de temperatura entre la superficie y el núcleo del componente, sin que esto condicione la transformación martensítica del acero.

En primer lugar se reduce la temperatura de austenización al final del proceso de cementación. Una vez la carga ha sido enviada a la célula de temple gaseoso, como primera etapa, el proceso de temple se inicia con una severidad baja, con una presión de gas y velocidad moderadas. Posteriormente, en la segunda etapa la intensidad del temple se aumenta para evitar en lo posible la formación de fases bainíticas y perlíticas.

La tercera etapa, y además la más crítica, consiste en reducir la velocidad del temple durante unos pocos segundos antes de iniciar la transformación martensítica en el acero, temperatura que depende fundamentalmente del contenido en carbono del acero. Cuanto y durante cuánto tiempo se debe reducir la velocidad del temple depende de la templabilidad del acero y de las dimensiones del componente.

Para ello se detiene la agitación del gas, manteniendo la presión, lo que potencia el mecanismo de transferencia de calor mediante conducción dentro de la masa del componente. De esta forma, se evita un gradiente excesivo de temperatura entre la superficie y el núcleo de la pieza, siendo este uno de los factores principales en la inducción de tensiones residuales y por tanto de deformaciones durante la transformación martensítica.

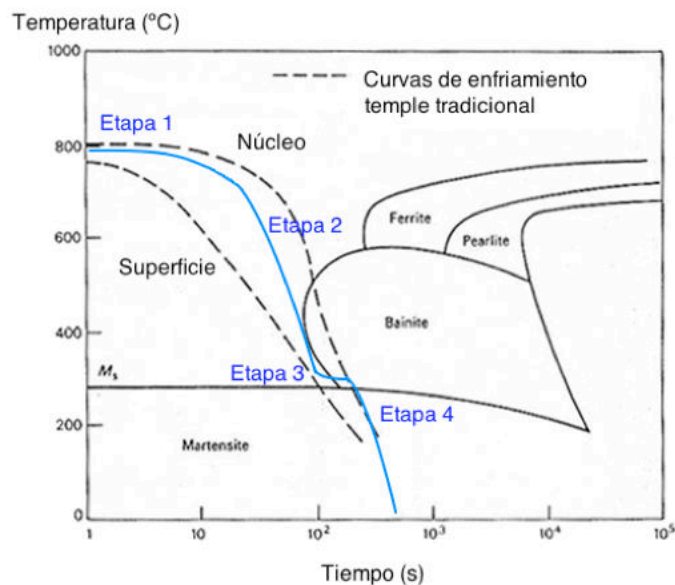


Figura A4- 35: Diagrama CCT con las etapas de un proceso de temple StepGQ, comparado con un temple en aceite tradicional.

Finalmente la última etapa del proceso de temple se ajusta para que la velocidad de enfriamiento sea máxima: esto permite acelerar la transformación martensítica.

Este proceso, denominado StepGQ permite por tanto ajustar la intensidad del proceso de temple durante las etapas críticas en las que la distorsión se produce de forma más intensa, con objeto de minimizarlas.

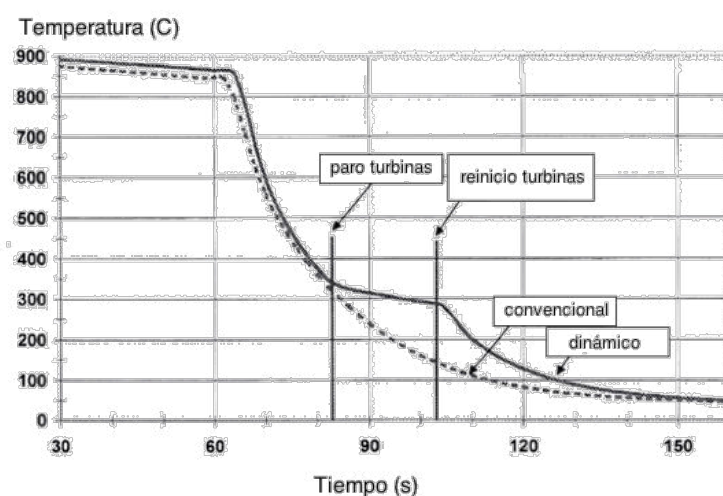


Figura A4- 36: Esquema del proceso de temple interrumpido.

Por tanto, esta variante del proceso de temple puede ser especialmente interesante en aquellos casos y aplicaciones en las que tenga que asegurarse un mínimo nivel de distorsiones dimensionales de los componentes tratados.

Cabe indicar también que diversos estudios efectuados sobre engranajes de transmisión cementados y templados con este proceso de temple interrumpido, apuntan también una mejora en el comportamiento a fatiga de los componentes en servicio respecto a los mismos componentes templados en gas de forma no interrumpida. Por tanto, la flexibilidad del temple en gas proporciona también un potencial de mejora en las propiedades mecánicas. (Jean Jaques Since)

BIBLIOGRAFÍA

A4. 47

- Air Products. *Gas Quenching with Air Products' rapid gas quenching gas mixture*.
- ALD-Holcroft. (2011). ModulTherm 2.0 Automated vacuum heat treatment systems. USA.
- ASM International. (2002). *ASM Handbook - Vol.4 Heat Treating*.
- ASM International. (1990). *ASM Handbook. - Vol.1 Properties and selection Irons Steels and high performance alloys*.
- Cheetham, B. &. *Low pressure carburising systems: a review of current technology*. BOC Edwards, UK.
- Daniel H.Herring, R. V. *New formula acetylene cool for heat treatment*.
- Delphi Diesel Systems, SL. (s.f.). Laboratorio.
- E.C.Bain, M. (1964). *Principles of Heat Treatment*. American Society for Metals.
- F.Chaffotte, L. D. (2006). Optimising Gas Quenching Technology through Modelling of Heat Transfer.
- G.Pellegrino. *Efficient numerical simulation techniques for high pressure gas quenching*.
- Herwing Altena, F. S. (s.f.). Low pressure carburising with high pressure gas quenching.
- Hill, R. *Hydrogen versus Helium: A comparative Study in High Pressure Gas Cooling Rates*.
- ICBP Fours. (s.f.). Instalaciones modulares. Tecnología ICBP.
- Ipsen International GmbH. (s.f.). *What you should know about Ipsen's vacuum technology*.
- Jean Jaques Since, O. I. (s.f.). Vacuum heat treatment and high pressure gas quenching - Aspects in distortion control.
- Löser, K. *Fundamentals and Trends of Gas Quenching*. ALD Vacuum Technologies AG.
- Linde AG. (s.f.). Furnace Atmospheres n.6 - LPC and gas quenching.
- Murry, G. (2007). Refroidissement après austénitisation. (382).

Anexo 5

Descripción de la
instalación de
cementación en baja
presión tipo ICBP-
H600TG/TH

Contenido Anexo 5

A5. Instalación de tratamiento térmico tipo ICBP-H600TG/TH (ECM) 5

 A5.1. Descripción del horno de tratamiento térmico 8

 A5.1.1. Células de alta temperatura 9

 A5.1.2. Transportador interno 14

 A5.1.3. Módulo de temple en aceite 15

 A5.1.4. Módulo de temple en gas 17

 A5.1.5. Módulos complementarios..... 20

 A5.1.6. Gases de proceso 22

Bibliografía..... 25

A5. INSTALACIÓN DE TRATAMIENTO TÉRMICO TIPO ICBP-H600TG/TH (ECM)

La instalación que se presenta a continuación corresponde al modelo de horno para procesos industriales que implementa la tecnología de cementación en baja presión propuesto por el fabricante francés ECM Fours. Este tipo de instalación fue introducido a partir de 1992: fundamentalmente, se trata de un concepto de hornos modulares y flexibles, de forma que su esquema constructivo puede adaptarse a los requerimientos específicos del cliente.

En principio, el concepto de instalación ICBP se concibe en dos posibles variantes: horizontal y vertical, haciendo referencia al sistema de carga, si bien la configuración horizontal es la versión que se ha convertido en estándar en la mayoría de casos. La opción vertical es adecuada cuando la pieza a tratar comporta determinadas limitaciones dimensionales, como por ejemplo cuando se trata de piezas especialmente largas, para series de piezas pequeñas, o cuando existen limitaciones de espacio para ubicar la instalación.

Desde el punto de vista de arquitectura modular de la instalación, el horno o máquina se concibe a partir de un elemento central o túnel sobre el que se van ensamblando en los laterales diferentes unidades funcionales o células. Esto permite que la instalación pueda efectuar de forma simultánea varios procesos de tratamiento térmico en la misma instalación, gracias a la complementariedad de las diferentes células.

Anexadas al túnel de la instalación, podemos unir:

- Células de calentamiento a alta temperatura y calefacción por gas o más comúnmente eléctrica: permitirá efectuar tratamientos de austenización, recocidos, cementación, carbonitruración, etc.
- Células de calentamiento a baja temperatura y calefacción por convección: precalentamiento en gas neutro, revenido, nitruraciones, preoxidación, etc.
- Células de temple: temple con gas a alta presión (monoflujo o multiflujo), y temple en aceite.

La arquitectura modular de la instalación posibilita también añadir células o módulos de tratamiento suplementarios a una instalación ya existente, lo que posibilita aumentar capacidades de producción o ampliar gamas de tratamiento térmico posibles.

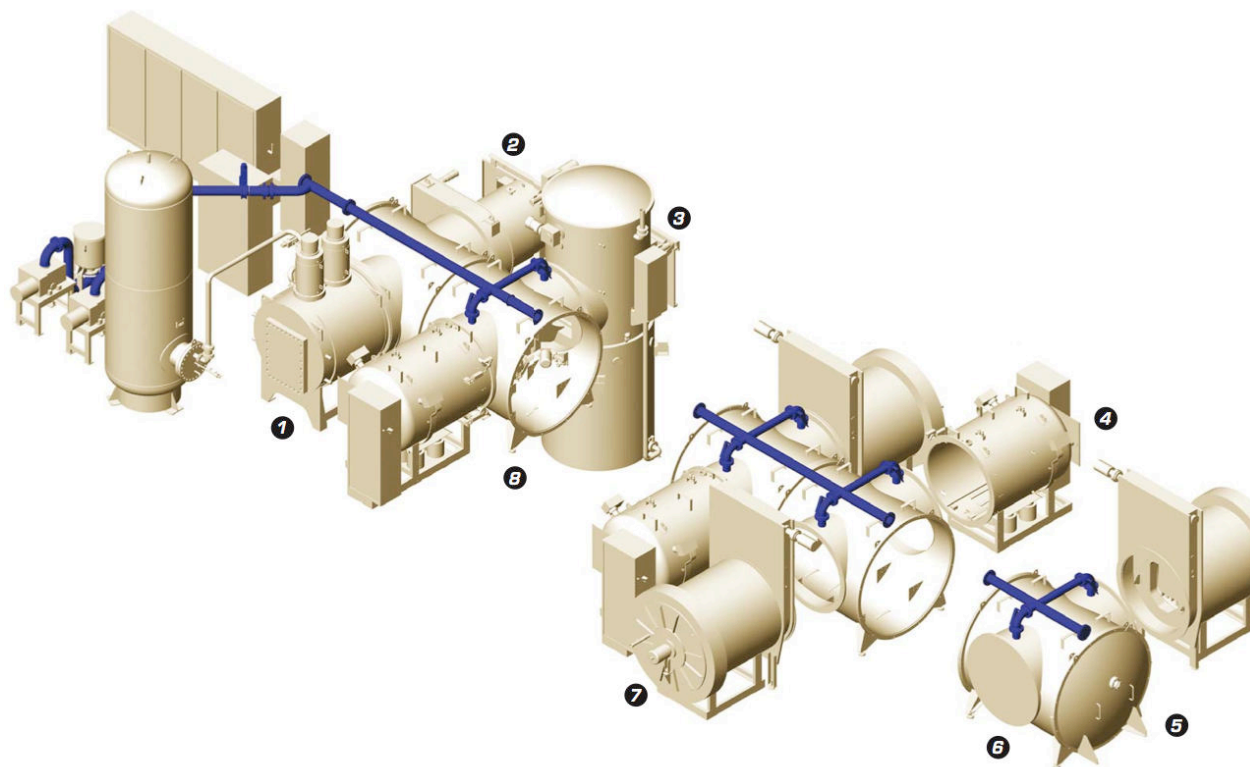


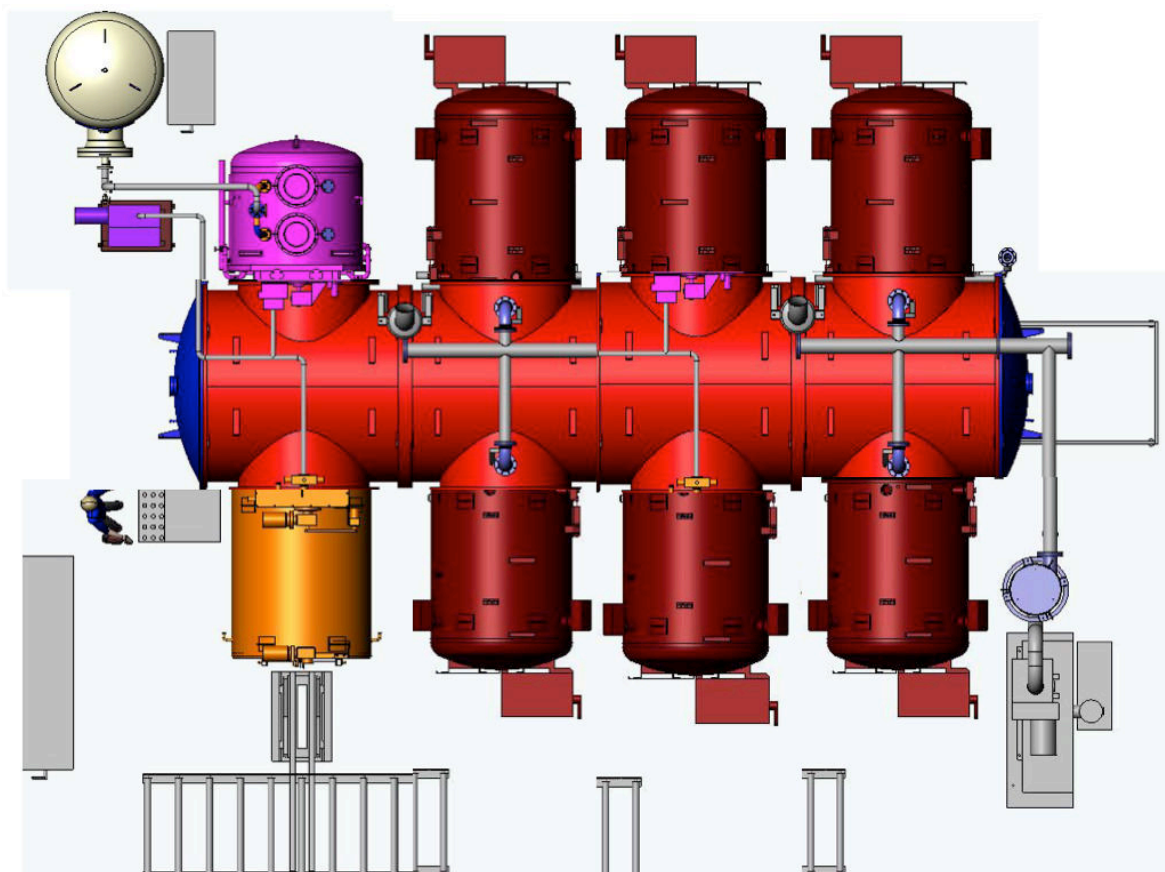
Figura A5- 1: Esquema de los módulos de una instalación típica tipo ICBP. (ECM Fours)

La figura anterior presenta de forma esquemática los distintos módulos que configuran una instalación de tratamiento térmico tipo ICPB. Los módulos esenciales que se unen al túnel central son los siguientes:

1. Célula de temple en gas.
2. Célula de entrada/salida de cargas.
3. Célula de temple en aceite.
4. Célula de calentamiento a alta temperatura.
5. Puerta de entrada al túnel para operaciones de mantenimiento.
6. Posiciones disponibles para ampliaciones.
7. Célula de baja temperatura.
8. Transportador interno para traslado de cargas.

Como se ha indicado, las ventajas principales que aporta este tipo de instalaciones, adicionales a los aspectos metalúrgicos propios del proceso de cementación a baja presión Infracarb de ECM, son su flexibilidad, productividad y en cierta medida también las mejoras que aporta en la protección del

personal, en tanto que se trata de una instalación fría que elimina los riesgos de incendio respecto a una instalación de cementación atmosférica tradicional.



A5. 7

Figura A5- 2: Modelo de la instalación ICBP-H600TG/TH. (ECM Fours)

En la figura se muestra el modelo constructivo de la instalación ICBP-H600TG/TH utilizada en las experiencias prácticas que se presentarán a continuación en este trabajo. Tal y como se muestra, consiste esencialmente en un horno equipado con 6 células de calentamiento a alta temperatura, una célula de temple por gas a alta temperatura y una célula de entrada y salida de cargas, que a su vez integra un módulo de temple en aceite dispuesto en la misma célula de carga y descarga.

Internamente, el túnel está equipado con un transportador que desplaza y traslada las cargas en las diversas etapas del proceso de tratamiento.

El manipulador interno de la instalación permite cargar y trasladar cargas de hasta 500 kg de masa, y se caracteriza por un rápido tiempo de traslado, apenas unos segundos en recorrer la longitud del túnel., se han ensamblado paneles metálicos en los laterales del robot para intentar aislar térmicamente la carga, lo que permite garantizar la calidad metalúrgica del temple.

Las células de cementación están revestidas internamente por elementos de grafito y permiten alojar cargas con unas dimensiones de 610 x 660 x 960 mm. El hidrocarburo de cementación utilizado en esta instalación es acetileno: el suministro de este gas se efectúa a partir de un rack de botellas presurizadas dispuesto externamente y conectado a las células de cementación mediante el *panel de gases*.

Como elementos externos al horno ICBP, encontramos un manipulador automático de cargas, un horno continuo en línea para efectuar el tratamiento de revenido posterior al temple y una lavadora de piezas templadas en aceite, que desengrasa por aspersión a presión utilizando una solución acuosa de detergente alcalino.

A5.1. DESCRIPCIÓN DEL HORNO DE TRATAMIENTO TÉRMICO

La instalación está configurada por dos hornos de cementación en baja presión con seis células de alta temperatura en cada horno acopladas al túnel principal. Cada horno cuenta con una célula de temple con nitrógeno a alta presión, así como una estación de carga y descarga que integra el equipo de temple en aceite. Los gases de proceso que se utilizan son acetileno para la cementación y nitrógeno como gas inerte durante la difusión.

Las características fundamentales de los diferentes módulos funcionales se describen a continuación.

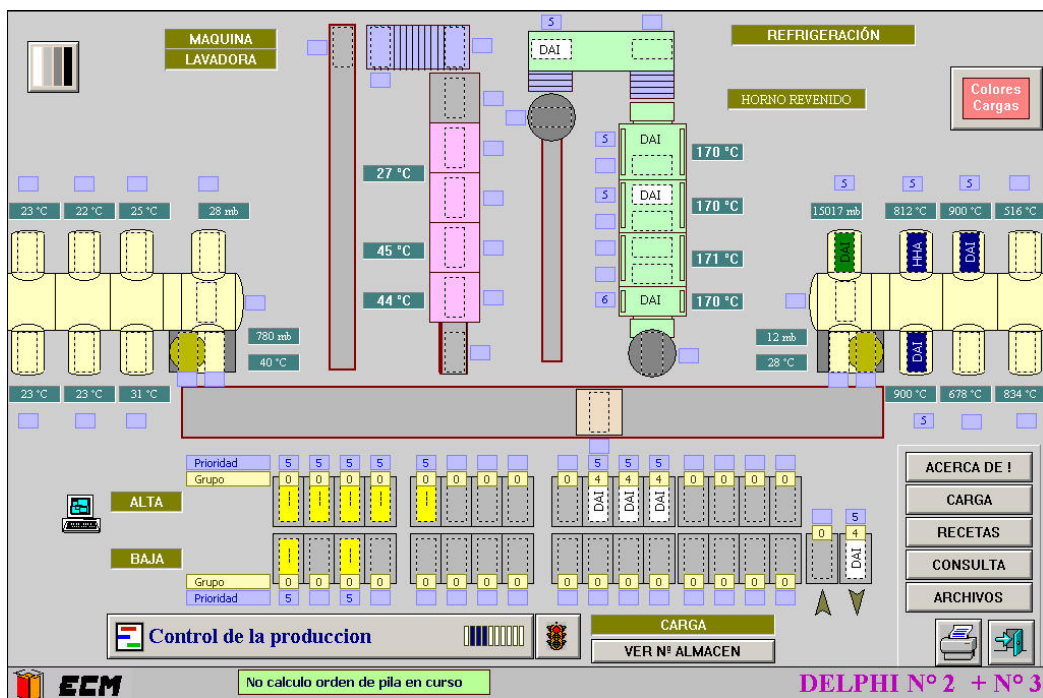


Figura A5- 3: Layout general de la instalación de TT. (Delphi Diesel Systems, SL)

A5.1.1. CÉLULAS DE ALTA TEMPERATURA

Las células de calentamiento están construidas a partir de un recinto de acero estanco refrigerado por agua, con doble pared. Permite alojar cargas con unas dimensiones máximas de 610 x 660 x 960 mm (ancho-profundidad-altura), y una masa máxima de 500 kg.

Interiormente, la estructura está forrada por pantallas calorífugas construidas con grafito (casing) destinadas a aislar térmicamente la célula.

La célula se cierra internamente mediante dos puertas basculantes, también de grafito, comandadas por dos actuadores neumáticos, que la aíslan térmicamente del túnel.

Una jaula de elementos de calefacción eléctrica, de grafito, alimentadas con baja tensión y cuya potencia de calentamiento (150 kVA) está regulada por un bloque de potencia de tiristores.

En la base de la célula se ubican unos soportes para fijar y soportar las cargas durante el ciclo de tratamiento térmico.



Figura A5- 4: Vista exterior de una célula de cementación, acoplada al túnel central. (Delphi Diesel Systems, SL)

3 termopares tipo K localizados en la zona inferior de la célula permiten monitorizar y controlar la temperatura de la célula durante el proceso: uno termopar para la regulación, otro de seguridad que permite disponer de una segunda lectura paralela a la lectura del sensor de regulación, y un tercer

termopar instalado pero no conectado, como elemento de reserva en caso de fallo de alguno de los anteriores.

La célula también está equipada con 5 anillos de inyectores distribuidos homogéneamente en el interior del receptáculo, destinados a la inyección de los gases durante el proceso.

Finalmente encontramos la brida que conecta la cámara interior con el circuito de vacío general de la instalación. Cada célula de alta temperatura dispone asimismo de su propio armario eléctrico.

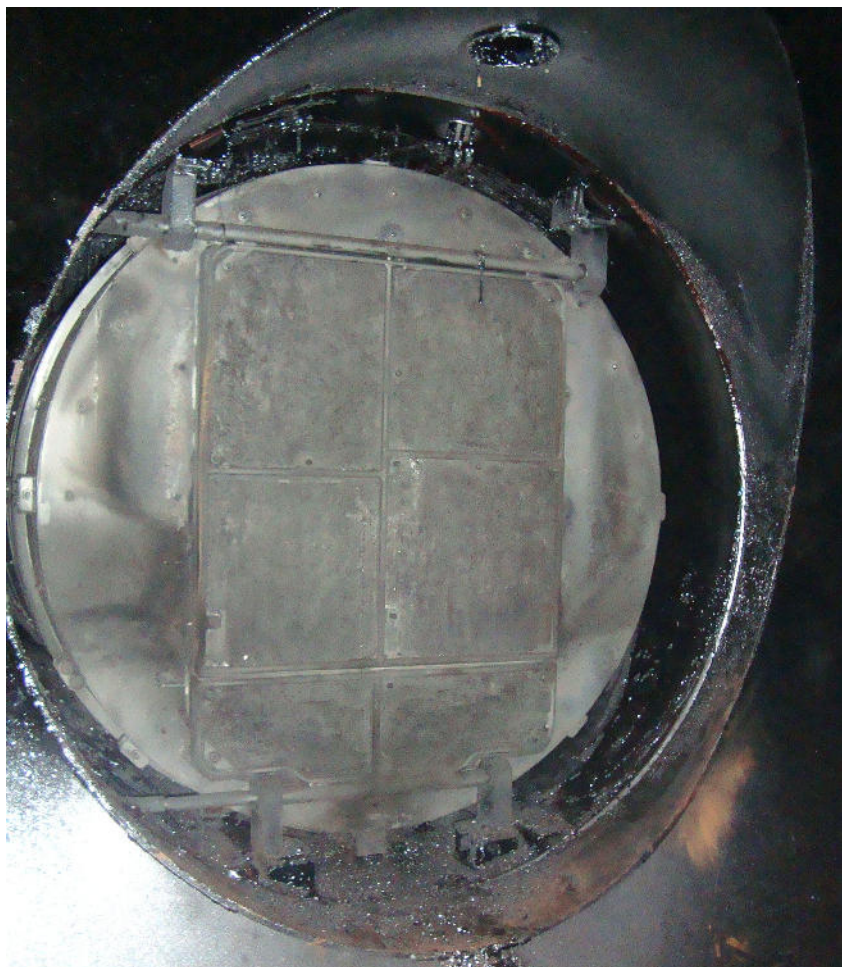
A5. 10



Figura A5- 5: Vista exterior de la célula de calefacción. (Delphi Diesel Systems, SL)

En la imagen anterior se presenta una vista del estructura externa de la célula: en la zona central inferior de la fotografía se aprecia, con los conectores en verde, la zona en la que se ubican los 3 termopares de control de la temperatura de la célula.

A continuación se muestra una vista tomada desde el interior del túnel en la que se pueden observar las puertas internas que aíslan la cámara de calefacción de la célula del interior del túnel. En la parte superior central se puede observar también la toma de vacío que se conecta al circuito de vacío de la instalación.



**Figura A5- 6: Detalle constructivo de las puertas interiores que aíslan térmicamente la célula del túnel.
(Delphi Diesel Systems, SL)**

En la imagen a continuación se puede apreciar la estructura del recubrimiento interior de grafito (casing), el cual se inserta en la estructura metálica de la célula de calefacción: la fotografía se ha tomado durante una operación de mantenimiento de la instalación, en la cual se sustituyeron los casings de las células de cementación. Se puede observar la disposición de los 5 anillos de inyectores que recubren la cámara y por los que se inyectan los gases de proceso (acetileno y nitrógeno).

A continuación, imagen tomada durante el proceso de instalación de un casing, en la que se muestra una sección del interior de la cámara de calefacción. Todos los elementos visibles en la imagen están contruidos con grafito: se observan los soportes en los que se apoya la carga, así como algunas de las barras de los elementos de calefacción y algunos inyectores que recubren todo el perímetro de la célula.



Figura A5- 7: Fotografía de un casing por su cara externa. Detalle de los anillos de inyectores. (Delphi Diesel Systems, SL)

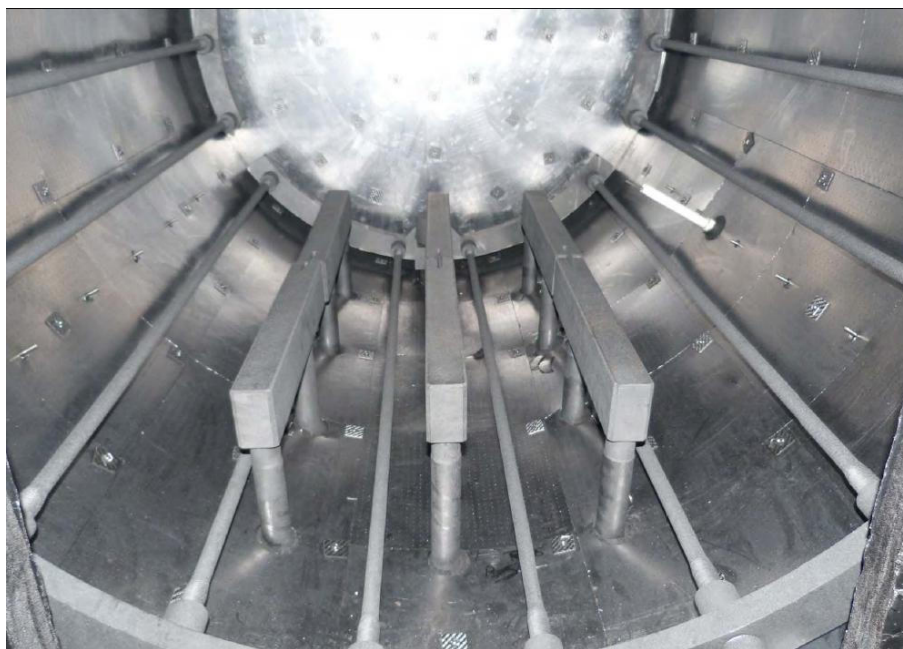


Figura A5- 8: Detalle del interior del casing de una célula de cementación. (Delphi Diesel Systems, SL)

Cada célula de cementación está equipada con un dispositivo referido como panel de gases, en el que se ubican las electroválvulas y los caudalímetros que gestionan y controlan los caudales de los gases de proceso para cada célula.

Si bien desde el software de gestión de la instalación se regulan y establecen los caudales de gases que participan en el proceso de tratamiento, es mediante las válvulas de regulación manuales que se ubican en el panel de gases que se lleva a cabo el ajuste o calibración de los caudales de gases.

También el ajuste efectuado manualmente sobre los caudalímetros permite asegurar la homogeneidad del caudal de los gases en los 5 anillos de inyectores que equipan las células.

A5. 13

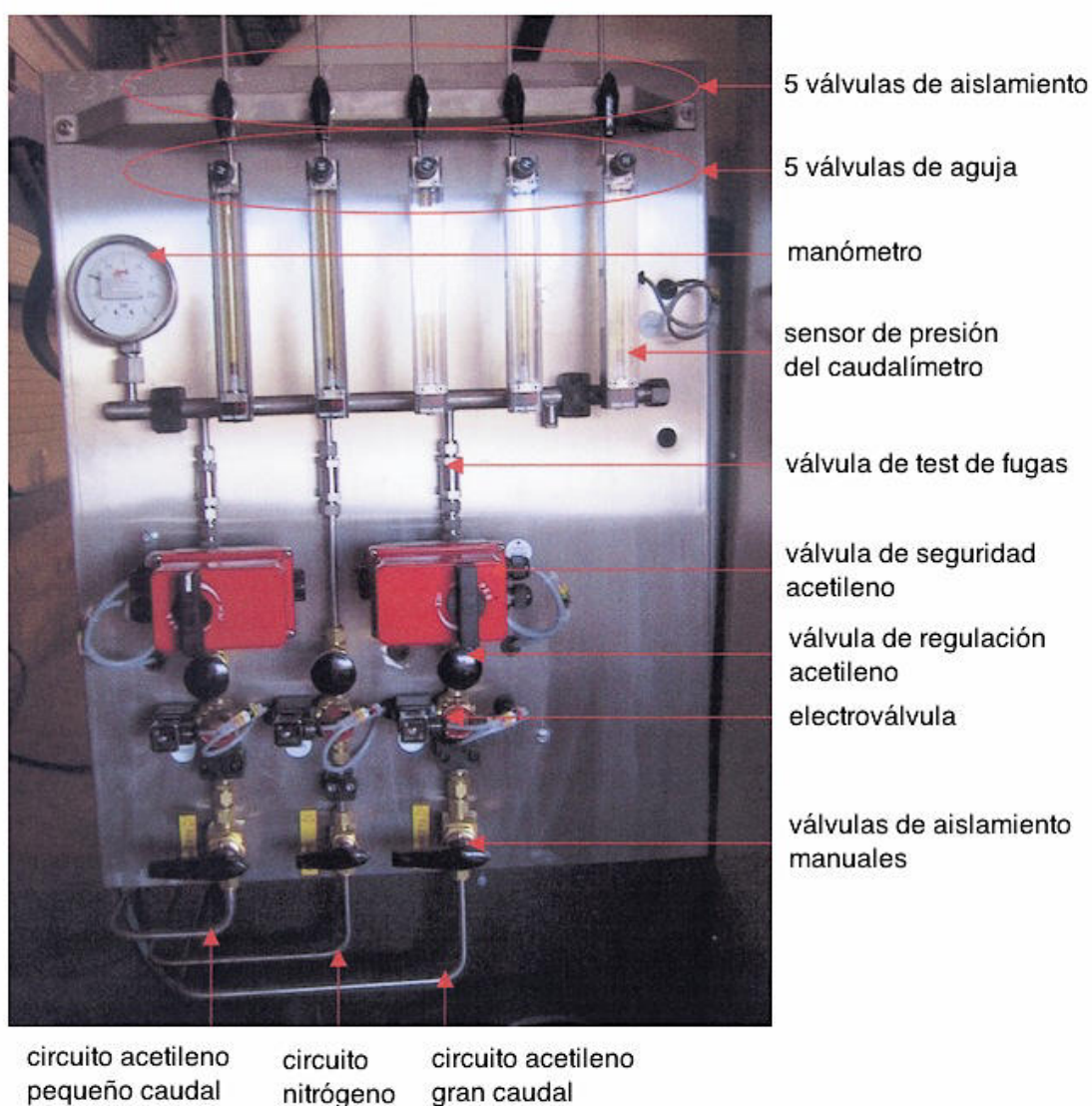


Figura A5- 9: Detalle del panel de gases. (ECM Fours)

A5.1.2. TRANSPORTADOR INTERNO

Este elemento de la instalación está ubicado en el interior del túnel y es responsable de trasladar las cargas en el interior de la instalación entre los distintos módulos funcionales.

El transportador se compone de los subconjuntos siguientes:

- El carro, que está encargado de los movimientos longitudinales dentro del túnel
- La mesa de traslado de las cargas hacia el interior de los diferentes puestos, constituida por los brazos y el portacargas, es responsable de los movimientos laterales y verticales.

Los desplazamientos longitudinales de la cargadora se efectúa sobre dos raíles que están montados sobre la estructura del túnel. Estos se llevan a cabo mediante un conjunto motorreductor SEW equipado con un piñón de cremallera fijada sobre el raíl guía.

El posicionamiento del carro está asegurado mediante un encoder incremental que permite controlar de forma precisa la posición de la unidad de traslado.

La mesa de traslado de las piezas hacia los diferentes módulos acoplados al túnel está instalada sobre el carro, en el centro de la falda térmica. Este elemento está compuesto de una mesa formada por dos brazos sobre los cuales descansan dos platos unidos entre sí. El conjunto está inclinado mediante un actuador pilotado por un motor durante el traslado de la carga.



Figura A5- 10: Detalle de la cargadora interna. (ECM Fours)

El desplazamiento lateral de los brazos se efectúa mediante un motorreductor situado debajo de la mesa, y es accionado por los cables de los brazos y los platos portacarga. La guía de los brazos y de los platos portacarga se asegura por un sistema combinado de rail y de rodillos. Un segundo encoder incremental se encarga de controlar las rampas de aceleración y deceleración, así como del posicionamiento de los brazos.

El movimiento vertical de la mesa de traslado se realiza mediante un gato de husillo con tornillo de rosca, fijado al chasis fijo y al chasis oscilante y accionado por un motor. 3 captadores inductivos gestionan el movimiento de este sistema.

Se dispone también de un chasis de mantenimiento de la cargadora que permite sacar la cargadora del tramo para realizar las actuaciones de mantenimiento: la instalación de este chasis se efectúa después de consignar la instalación y abrir las puertas del túnel.

A5.1.3. MÓDULO DE TEMPLE EN ACEITE

Esta unidad está integrada junto con el módulo de entrada/salida de cargas en la instalación, conectada al túnel de la instalación en uno de sus laterales.

La cuba de temple en aceite aglomera los siguientes subconjuntos:

- Montacargas.
- Dispositivo de calefacción.
- Dispositivo de refrigeración del aceite.
- Puerta interna, entre módulo de temple y túnel.
- Puerta externa, entre módulo de temple y exterior.
- Panel de gas.
- Armario eléctrico

Una estructura interna dispuesta y solidaria con la cuba de temple permite aceptar las cargas a templar antes de sumergirlas en el aceite. Un ascensor permite bajar y subir el carro que contiene la carga de piezas en la cuba de aceite, gestionado por un motorreductor que está ubicado sobre el ascensor y guiado por railes y rodillos. La posición del ascensor está controlada por captadores magnéticos.

La capacidad de la cuba de aceite es de 6000 l, y la agitación de este aceite se asegura mediante dos agitadores de hélices localizados en la base de la cuba.

La temperatura del aceite es regulable y se calienta a partir de 2 resistencias eléctricas de 12,5 kW cada una y sumergidas en el baño. Por su parte, también existe un dispositivo de refrigeración que

enfría el aceite después del ciclo de temple: consiste en un intercambiador de calor multitubular alimentado por el circuito de agua. Una sonda PT100 monitoriza la temperatura del aceite.

El módulo de temple en aceite está acoplado al túnel de la instalación, y por tanto se encuentra también en condiciones de vacío. No obstante, puede inyectarse nitrógeno en la cámara para incrementar la presión durante la operación de temple, puesto que dos puertas herméticas aíslan este módulo tanto del exterior como de la atmósfera del túnel que se mantiene en condiciones de vacío.



**Figura A5- 11: Vista exterior del módulo de entrada/salida de cargas con temple en aceite integrado.
(Delphi Diesel Systems, SL)**

A5.1.4. MÓDULO DE TEMPLE EN GAS

La célula de temple en gas está formada por un recinto metálico estanco y calculado para una presión de trabajo de 20 bar absolutos.

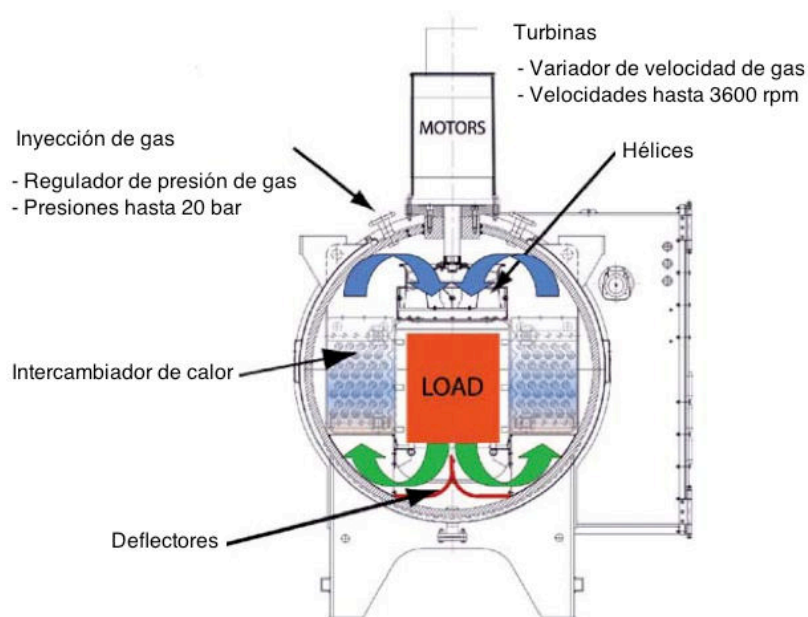
Está equipada con dos turbinas localizadas en la parte superior que hacen circular el gas de temple sobre las piezas desde arriba hacia abajo, y posteriormente lo envían a dos intercambiadores de calor de aletas refrigerados mediante circulación de agua. Una cámara de convección de sección rectangular para alojar las cargas permite orientar y canalizar el gas de refrigeración a través de las piezas.



Figura A5- 12: Exterior de la célula de TG. (Delphi Diesel Systems, SL)

La estanqueidad de la célula está asegurada por una junta de labio en silicona que se comprime durante el proceso de temple.

La siguiente figura muestra el esquema constructivo de la célula de temple en gas:



A5. 18

Figura A5- 13: Esquema sección del módulo de TG. (ECM Fours)

El sistema de gestión y control de la operación de temple en gas permite regular la presión de nitrógeno dentro de la cámara, el tiempo de aplicación y la agitación y recirculación del gas, actuando sobre la velocidad de las turbinas. El volumen de la célula es de 2,8 m³, y está previsto para temprar una masa máxima de 500 kg y unas dimensiones máximas de carga de 500 x 660 x 960 mm (incluyendo soportes y útiles).



Figura A5- 14: Detalle constructivo: hélices de las turbinas. (Delphi Diesel Systems, SL)

Entre la instalación exterior que evapora y suministra nitrógeno gas al horno y la célula de temple, existe un depósito intermedio de nitrógeno gas a alta presión.

Este tanque intermedio es requerido para que en el momento de efectuar el temple exista una cantidad de nitrógeno suficiente disponible y con la presión adecuada: este depósito debe estar presurizado a 30 bar antes de lanzar un ciclo de temple y permite presurizar la célula de temple a 20 bar de forma prácticamente instantánea.

Por otra parte, el software de gestión de la instalación permite monitorizar en base tiempo los siguientes parámetros de proceso durante la fase de temple:

- Presión de la célula.
- Consumo eléctrico de cada turbina.
- Temperatura del agua de alimentación al intercambiador que refrigera el gas.
- Temperatura del agua en la salida del intercambiador.

Los consumos eléctricos de las turbinas dependen de factores como la presión de gas en la célula y de su temperatura.

Por otra parte, la variación de la temperatura del agua en la salida del intercambiador también es un indicador de la eficiencia del intercambio térmico entre las piezas de la carga y el nitrógeno de temple. El seguimiento de estas variables del proceso en cada ciclo de temple que efectúa la instalación permiten monitorizar el proceso adecuadamente.

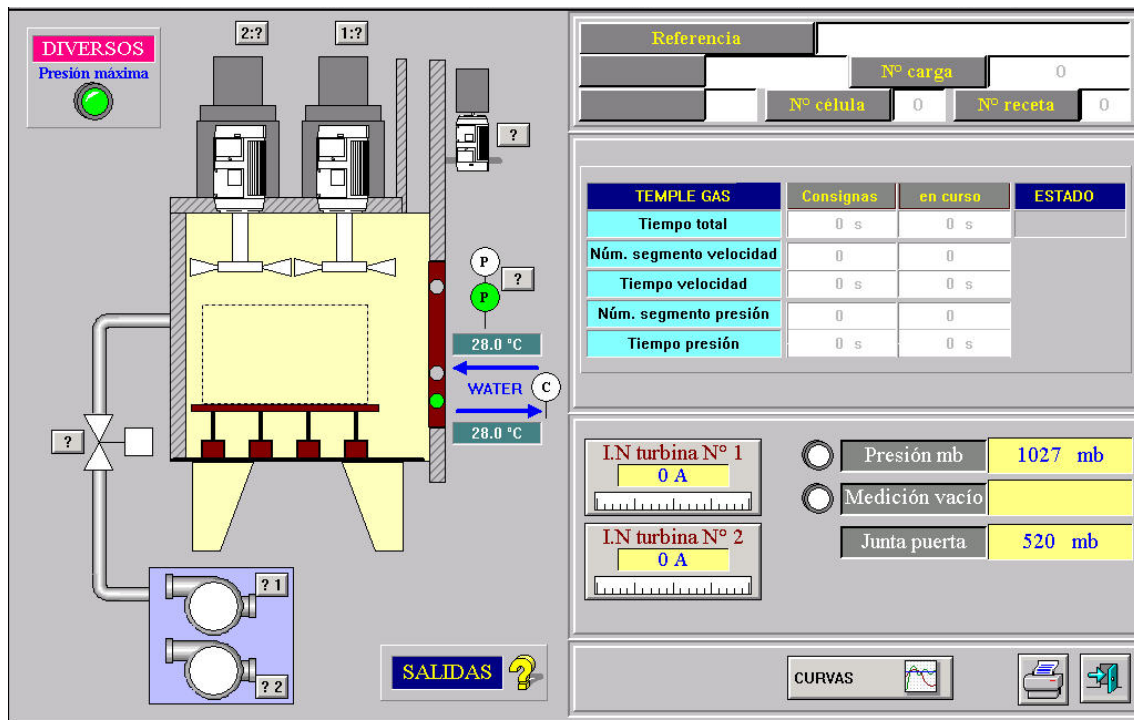


Figura A5- 15: Diagrama de la célula de TG y seguimiento variables operación. (Delphi Diesel Systems, SL)

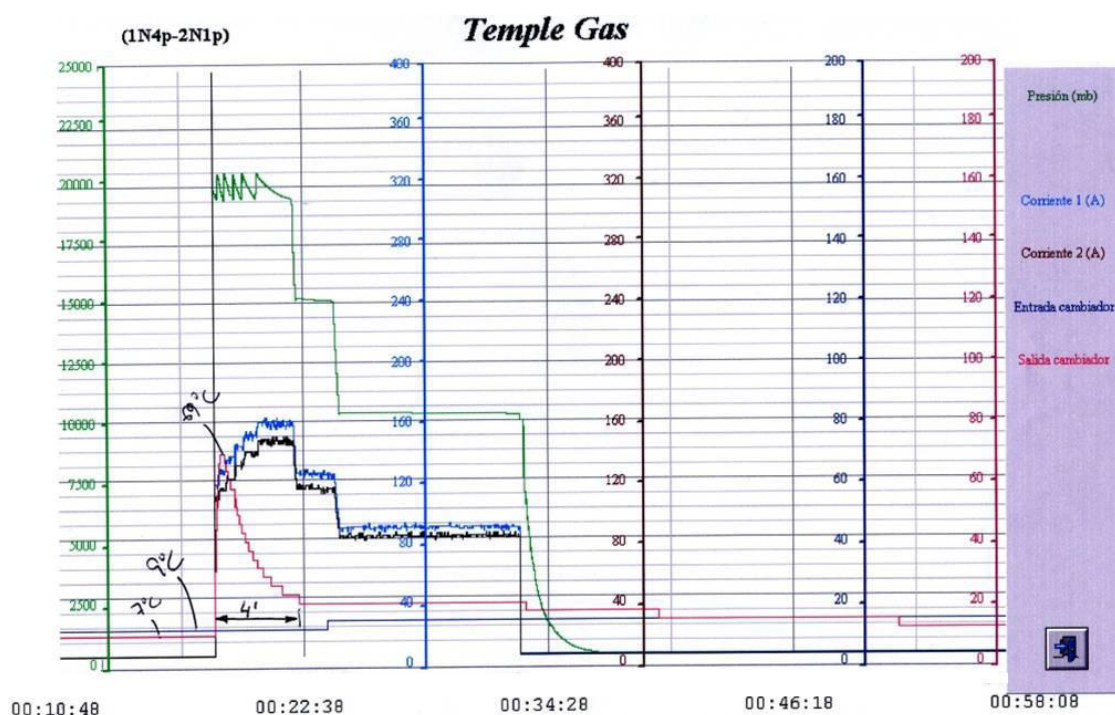


Figura A5- 16: Ejemplo de gráfico de proceso de un ciclo de temple en gas. (Delphi Diesel Systems, SL)

A5.1.5. MÓDULOS COMPLEMENTARIOS

Esta tecnología de tratamiento térmico requiere que la instalación se encuentre en condiciones de vacío o baja presión, por lo que requiere de grupos y sistemas mecánicos de vacío que permiten alcanzar la atmósfera requerida por el proceso, situando la presión interna de la instalación en el rango de 7 a 12 mbar.

Para conseguir este nivel de vacío, la instalación está equipada por dispositivos en serie: una bomba Leybold de paletas rotatorias, responsable de la etapa principal del vacío, y una bomba Roots que se encarga de conseguir el nivel de vacío final en la instalación.

Adicionalmente, los módulos de temple en gas y de carga/descarga disponen de sistemas de vacío específicos y complementario (bombas Stokes).

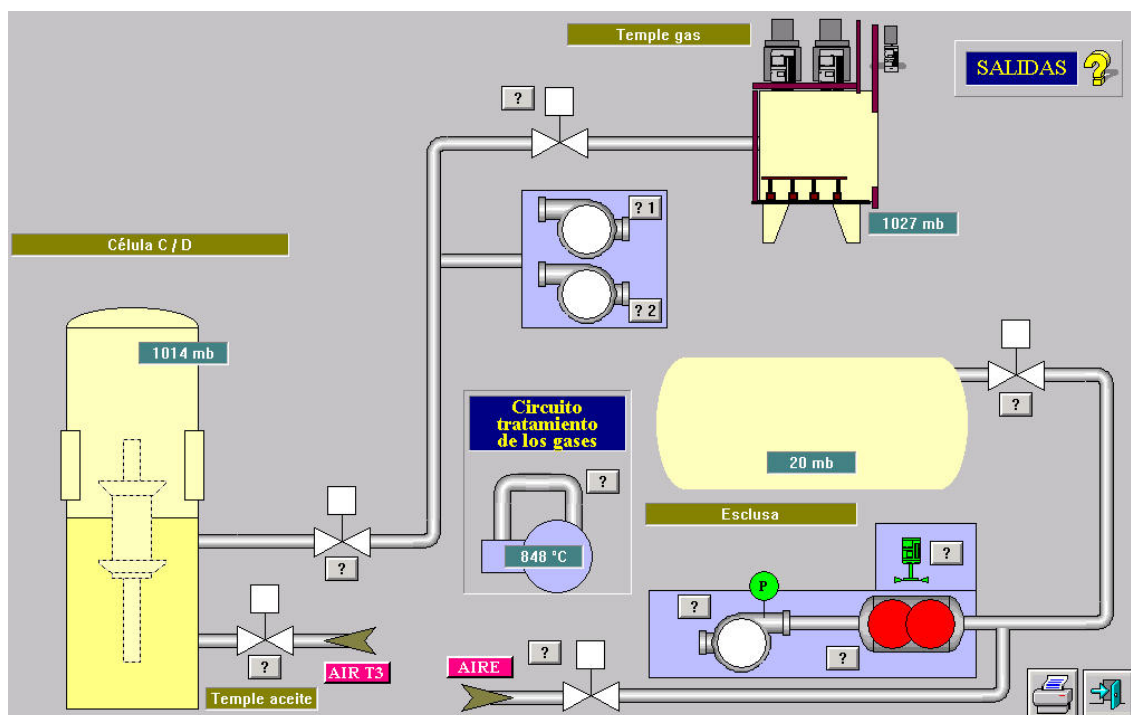


Figura A5- 17: Esquema del circuito de vacío de la instalación ICBP. (Delphi Diesel Systems, SL)

Las bombas de vacío Roots son bombas de desplazamiento positivo donde 2 rotores simétricos de sección en forma de ocho, giran sin contacto entre ellos y ni con el cuerpo, el uno en sentido contrario al otro, engranados regularmente, y alojados dentro del cuerpo de la bomba. El accionamiento de los pistones es a través de un juego de engranajes que sincronizan su movimiento de rotación y que garantizan la ausencia de roces entre ellos.

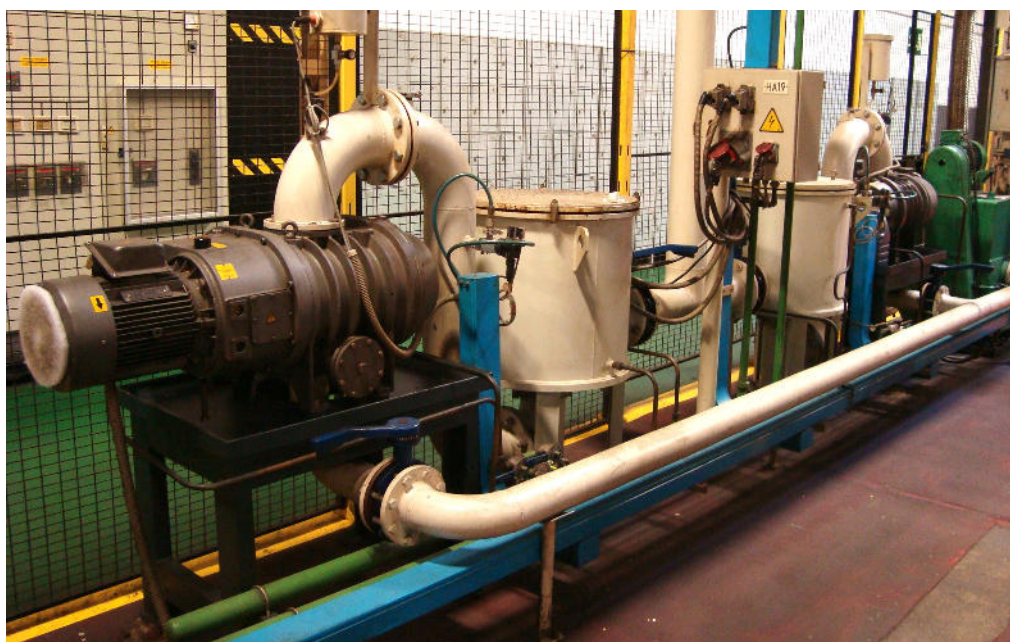


Figura A5- 18: Vista de las bombas de vacío Roots de la instalación. (Delphi Diesel Systems, SL)

Otro de los elementos funcionales de la instalación es el que se encarga de eliminar las fracciones gaseosas residuales y excedentes de los hidrocarburos empleados en el proceso de cementación antes de ser emitidas a la atmósfera exterior: este módulo, denominado STG (sistema de tratamiento de gases), es en realidad un dispositivo que quema o incinera las emisiones gaseosas procedentes de la instalación ICBP. Desde un punto de vista constructivo, el elemento fundamental es un bujía incandescente que calienta una cámara por la que circulan los gases antes de ser emitidos al exterior. La temperatura de trabajo de esta cámara es de 850°C, por lo que todos los hidrocarburos y fracciones procedentes del horno son quemados.

A5.1.6. GASES DE PROCESO

En referencia a los gases técnicos, el acetileno es suministrado a la instalación desde un conjunto de botellas presurizadas que se emplazan en el exterior de la planta: estas botellas de acero están rellenas de una masa porosa formada por asbestos y cementos especiales (AGA) e impregnada de DMF (N, N-dimetilformamida) que actúa como disolvente del acetileno durante el transporte y almacenamiento: el uso de disolventes viene dado por los riesgos de explosión implícitos a la presurización del acetileno puro en botellas. En algunas aplicaciones también se utiliza acetona como disolvente del acetileno, sin embargo, para las aplicaciones de tratamiento térmico, la acetona no es una buena alternativa debido a que es más volátil que la DMF, y cuando el consumo del acetileno hace disminuir la presión en la botella, existe el riesgo de evaporación de acetona, que se transporta

junto al acetileno hacia el horno de tratamiento térmico contaminando al gas de cementación.



Figura A5- 19: Rack de botellas de acetileno.
(Abello Linde)

Las botellas o cilindros deben almacenarse en posición vertical cuando está la válvula abierta, para evitar que el disolvente fluya junto con el acetileno hacia la instalación de tratamiento térmico. Por esta misma razón, es recomendable que cuando la presión del circuito de alimentación de acetileno alcance 1.2 bar, se proceda a la sustitución de los cilindros.

Es importante indicar que tanto las botellas como las conducciones y válvulas del circuito de distribución de acetileno deben estar construidas con aleaciones férricas. El uso de cobre o sus aleaciones con más del 70% de este elemento no está permitido por razones de seguridad: bajo ciertas condiciones, el acetileno puede combinarse con el cobre o la plata para formar acetiluros. Estos compuestos tienen unas características explosivas, y puede explotar si se expone al calor o energía mecánica. La reacción explosiva de estos acetiluros, en consecuencia, puede provocar la descomposición del acetileno.

El rango de caudal de propano típico en estos procesos de tratamiento térmico varían y se definen en función de variables como la superficie de la carga o las dificultades geométricas que puedan presentar las piezas. En nuestro caso, nos situamos en el rango de 2500 l/h de acetileno puro, si bien éste caudal puede variar en función del componente que conforme la carga.

Las características técnicas típicas para el acetileno son las siguientes

Parámetro	Concentración
Pureza	≥99,6%
Disolvente	DMF
Oxígeno + metano	≤4000 ppm
Fosfina (PH ₃)	≤500 ppm
Dióxido de carbono	≤500 vpm
Amonio	≤200 vpm
Humedad	≤700 vpm
Compuestos de azufre	≤200 ppm

Respecto al nitrógeno, este gas se suministra a la instalación de tratamiento térmico a partir de una instalación de generación in situ situada en el exterior de la planta: estas instalaciones modulares generan nitrógeno gas de alta pureza a partir de la evaporación de nitrógeno líquido suministrado por el proveedor en camiones cisterna.

El nitrógeno generado sirve tanto como nitrógeno de proceso para las etapas de calentamiento y difusión en el tratamiento térmico, como para el temple en gas a alta presión.

Las características técnicas típicas del nitrógeno líquido suministrado son:

Parámetro	Concentración
Pureza Nitrógeno	≥99,995 %
Oxígeno	≤5 ppm
Agua	≤3 ppm

El caudal de nitrógeno que alimenta a las células de alta temperatura está ajustado aproximadamente en 1800 l/h. Este caudal de gas inerte está presente durante todo el proceso de tratamiento térmico, excepto cuando tienen lugar las etapas de cementación mediante inyecciones de acetileno.

BIBLIOGRAFÍA

Abello Linde. (s.f.). Consejo de seguridad. Manipulación del Acetileno.

Delphi Diesel Systems, SL. (s.f.). Sant Cugat del Vallés.

ECM Fours. (s.f.). Instalaciones modulares. Tecnología ICBP.

ECM Fours. (s.f.). Manuales de mantenimiento.

Anexo 6

Resultados del ejercicio de
validación de la
homogeneidad de
temperatura en las células

Contenido Anexo 6

A6. Resultados del TUS para las células del ICBP..... 5

A6.1. Resultados TUS para célula 2 6

A6.2. Resultados TUS para célula 3 9

A6.3. Resultados TUS para célula 4 12

A6.4. Resultados TUS para célula 5 15

A6.5. Resultados TUS para célula 6 18

A6. RESULTADOS DEL TUS PARA LAS CÉLULAS DEL ICBP

A6. 5

A continuación se presentan en detalle los resultados del ejercicio que permite cuantificar el nivel de homogeneidad térmica de las cámaras ó células de alta temperatura de la instalación ICBP, referido como TUS (*temperature uniformity survey*) en la norma AMS-2750D.

Recordar que esta instalación está equipada con 6 células dispuestas alrededor de un elemento central o túnel. Los resultados correspondientes al ejercicio desarrollado sobre la célula 1 se presentan en el capítulo principal de esta memoria. Los resultados relativos a las células 2 a 5 se exponen a continuación.

El esquema que relaciona el número del termopar con su posición en el paralelepípedo es el siguiente, manteniéndose para todos los ensayos efectuados:

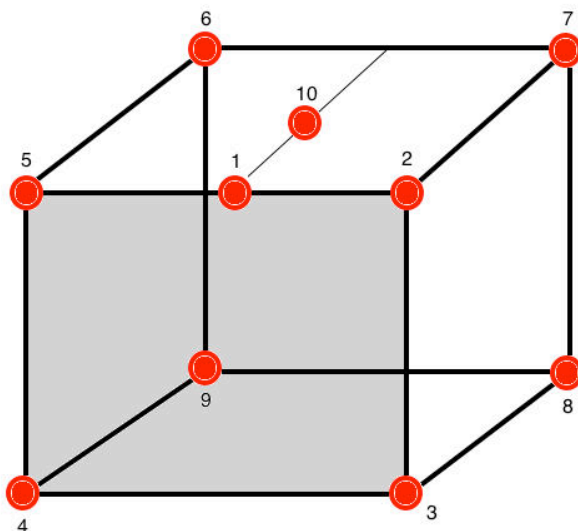


Figura A6- 1: Localización de la sondas de temperatura en el montaje del TUS.

A6.1. RESULTADOS TUS PARA CÉLULA 2

Análisis de estabilidad y homogeneidad:

Monitorización de la estabilidad de la temperatura en cada posición durante 30 minutos: rango de lecturas

Termopar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Mínimo	933,5	936,5	933,6	934,7	935,9	934,5	933,9	932	933,6	935,5
Máximo	934,6	938,1	935,7	937	938	936,4	935,9	934,1	934,8	936,3
Diferencia máxima de temperatura				6,1°C	Criterio: <10°C				Correcto	

Análisis de dispersión:

Monitorización de la dispersión instantánea de temperaturas en todo el paralelepípedo durante 30 minutos

Mínimo	3,3°C	Promedio	4,2°C	Máximo	5,7°C
--------	-------	----------	-------	--------	-------

Factor de corrección:

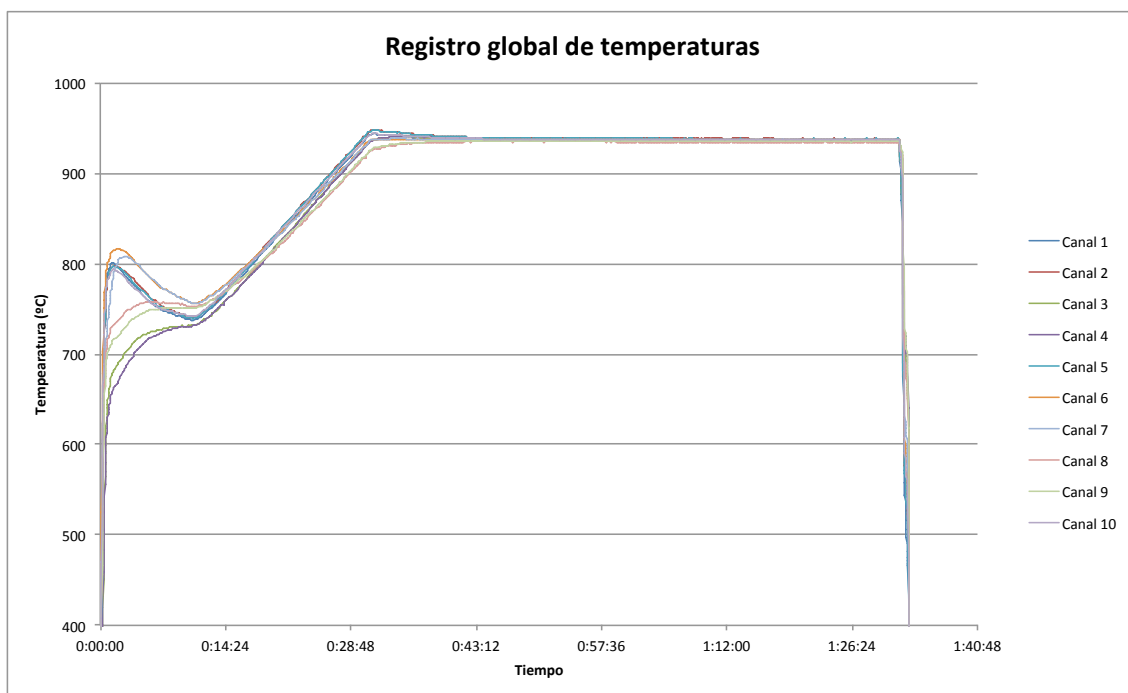
Desviación de la temperatura media observada en cada posición durante 30 minutos respecto a la temperatura de consigna

Termopar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Promedio	934,1	937,4	934,8	936,0	937,0	935,6	935,0	933,2	934,3	935,9
Consigna	940	940	940	940	940	940	940	940	940	940
Desviación	-5,9	-2,7	-5,2	-4,0	-3,0	-4,2	-5,0	-6,8	-5,7	-4,1
Media desviación - factor corrección				-4,7°C	Criterio: <±5°C				Incorrecto	

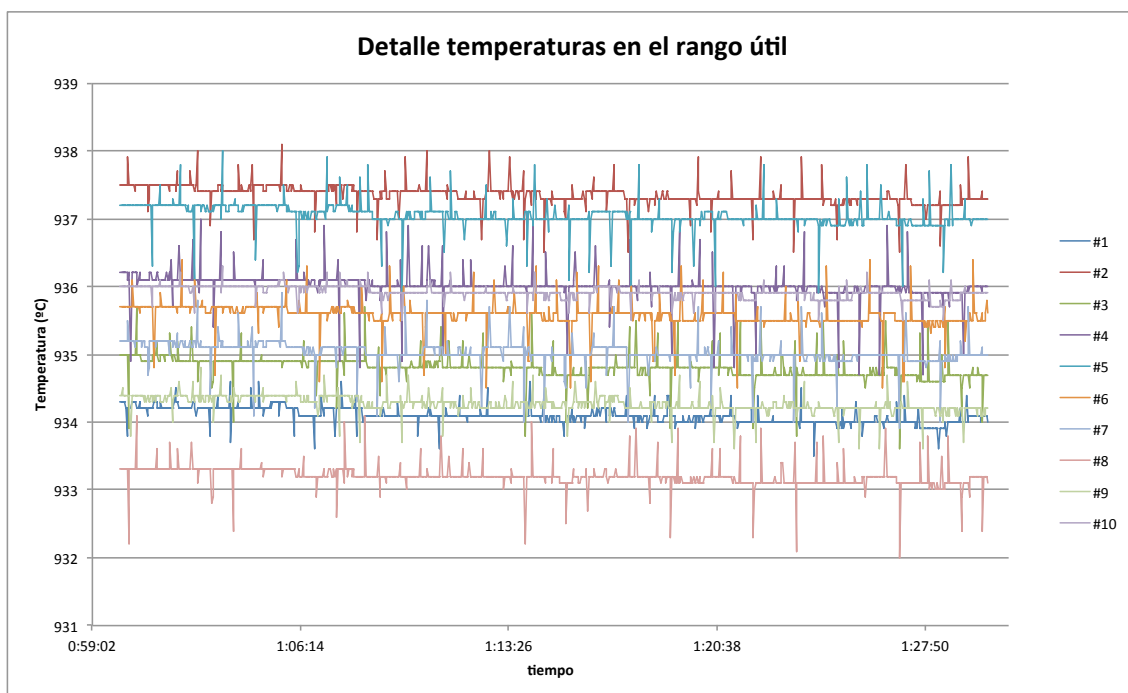
Valores corregidos

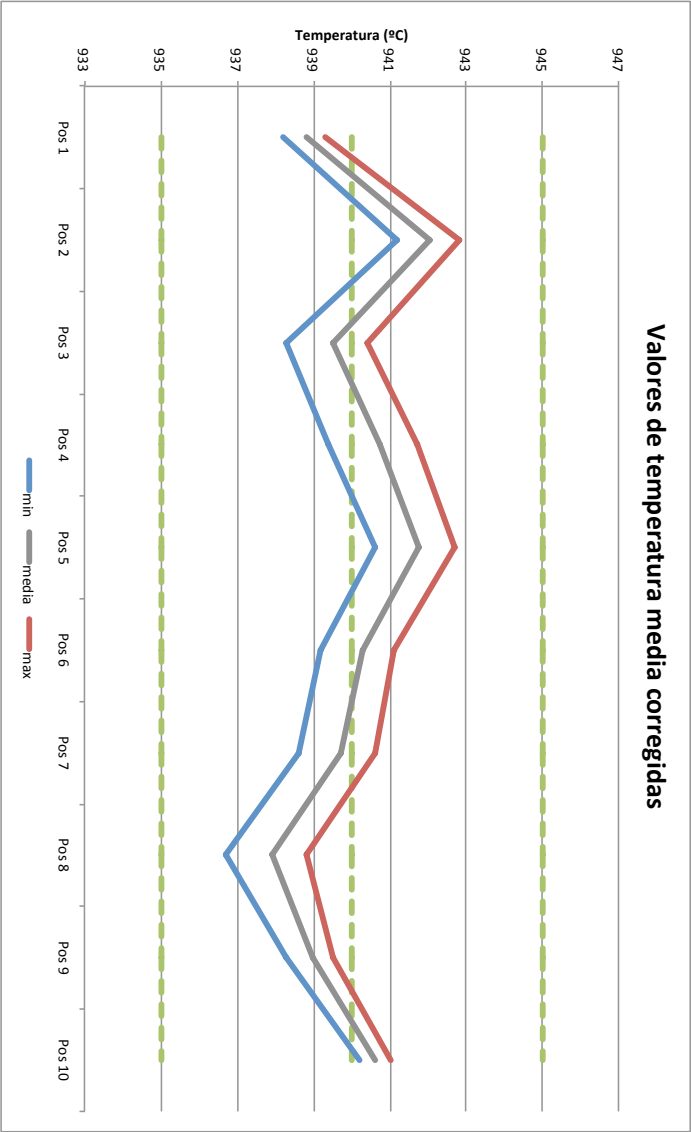
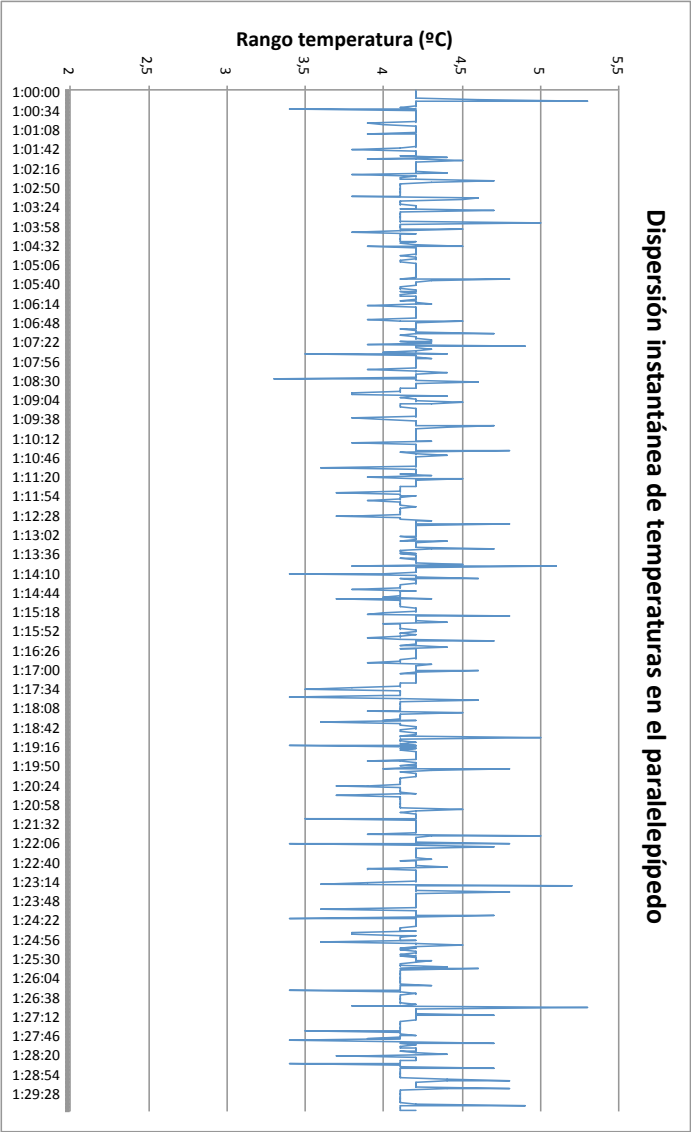
Monitorización de la estabilidad de la temperatura en cada posición durante 30 minutos

Termopar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Mínimo	938,2	941,2	938,3	939,4	940,6	939,2	938,6	936,7	938,3	940,2
Promedio	938,8	942,1	939,5	940,7	941,7	940,3	939,7	937,9	939,0	940,6
Máximo	939,3	942,8	940,4	941,7	942,7	941,1	940,6	938,8	939,5	941,0
Desvío 940°C	-1,2	2,1	-0,5	0,7	1,7	0,3	-0,3	-2,1	-1,0	0,6



A6. 7





A6.2. RESULTADOS TUS PARA CÉLULA 3

Análisis de estabilidad y homogeneidad:

Monitorización de la estabilidad de la temperatura en cada posición durante 30 minutos: rango de lecturas

Termopar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Mínimo	949,2	951,2	948	948,7	949,6	949,5	948,6	945,7	949,3	951,7
Máximo	950,2	952,6	949,9	950,7	951,3	951,4	950,4	947,8	950,5	952,4
Diferencia máxima de temperatura				6,9°C			Criterio: <10°C			Correcto

Análisis de dispersión:

Monitorización de la dispersión instantánea de temperaturas en todo el paralelepípedo durante 30 minutos

Mínimo	4,4°C	Promedio	5,3°C	Máximo	6,4°C
--------	-------	----------	-------	--------	-------

Factor de corrección:

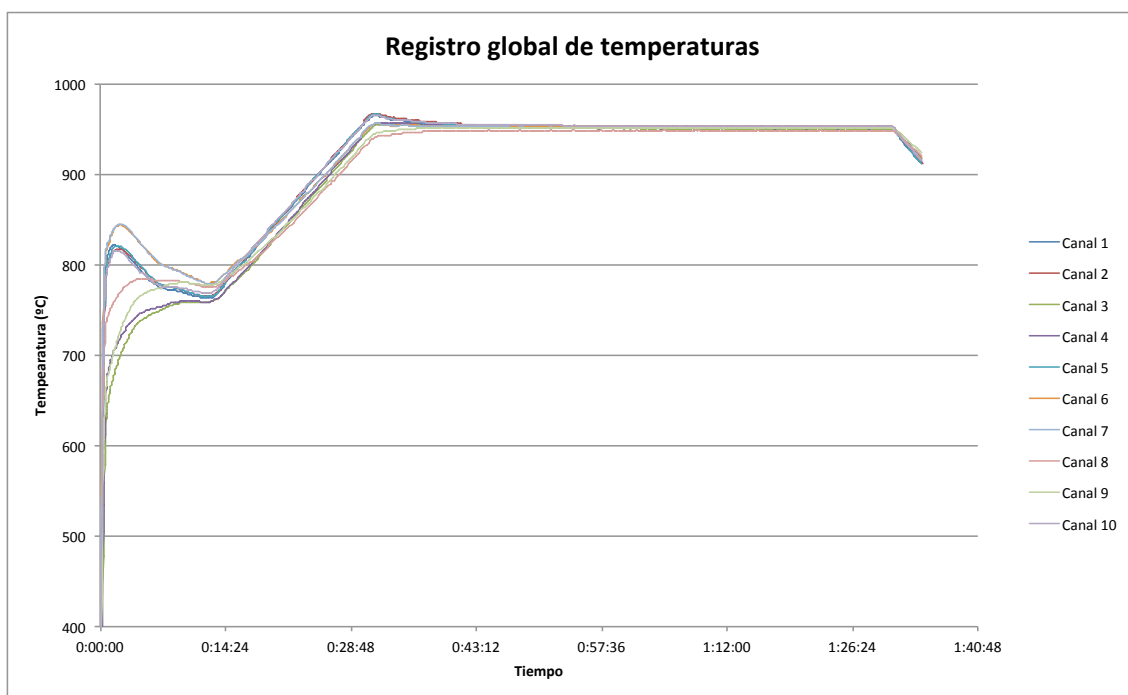
Desviación de la temperatura media observada en cada posición durante 30 minutos respecto a la temperatura de consigna

Termopar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Promedio	949,8	952,0	949,1	950,0	950,8	950,7	949,7	946,9	950,0	952,2
Consigna	940	940	940	940	940	940	940	940	940	940
Desviación	9,8	12,0	9,1	10,0	10,8	10,7	9,7	6,9	10,0	12,2
Media desviación - factor corrección				-10,1°C			Criterio: <±5°C			Incorrecto

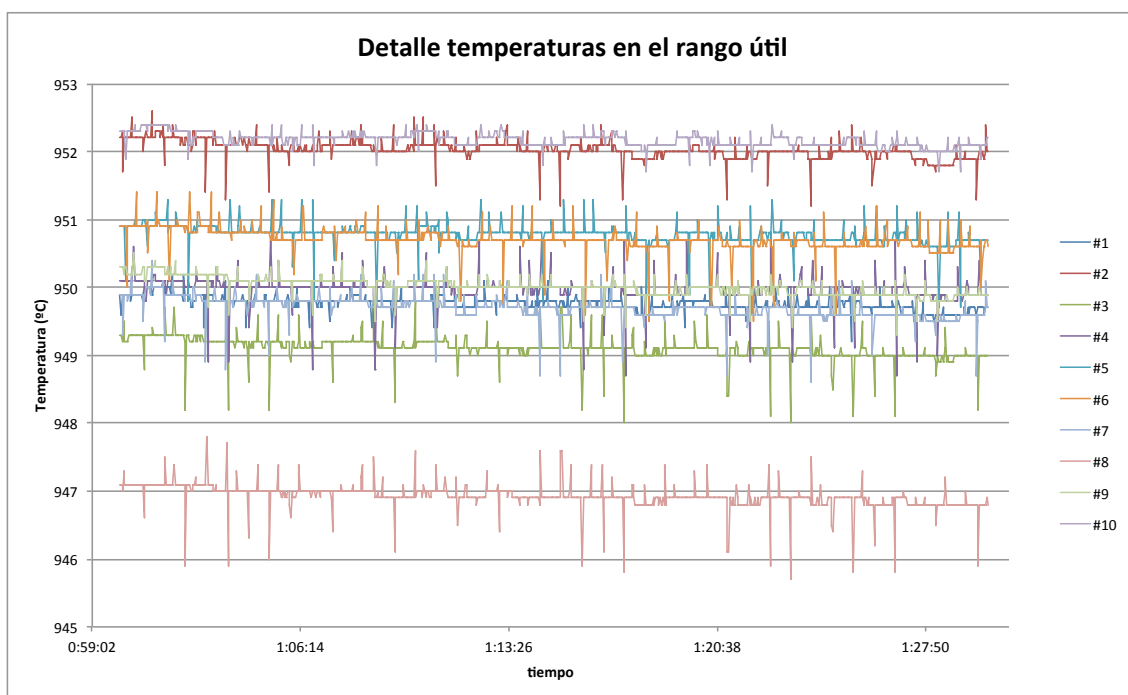
Valores corregidos

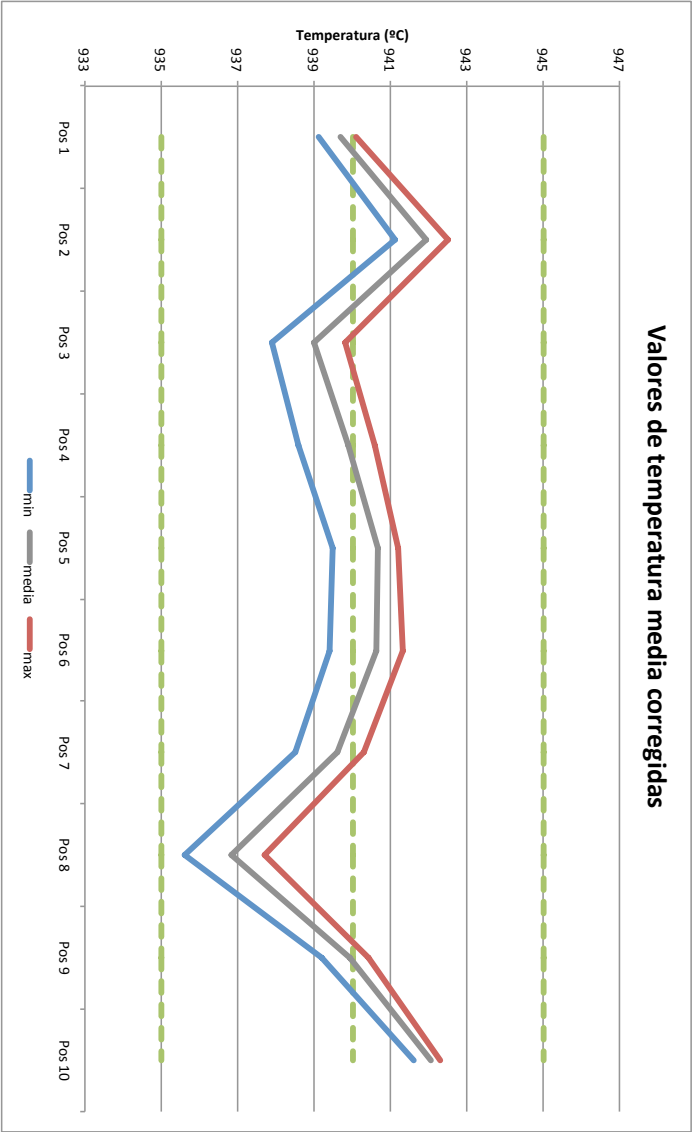
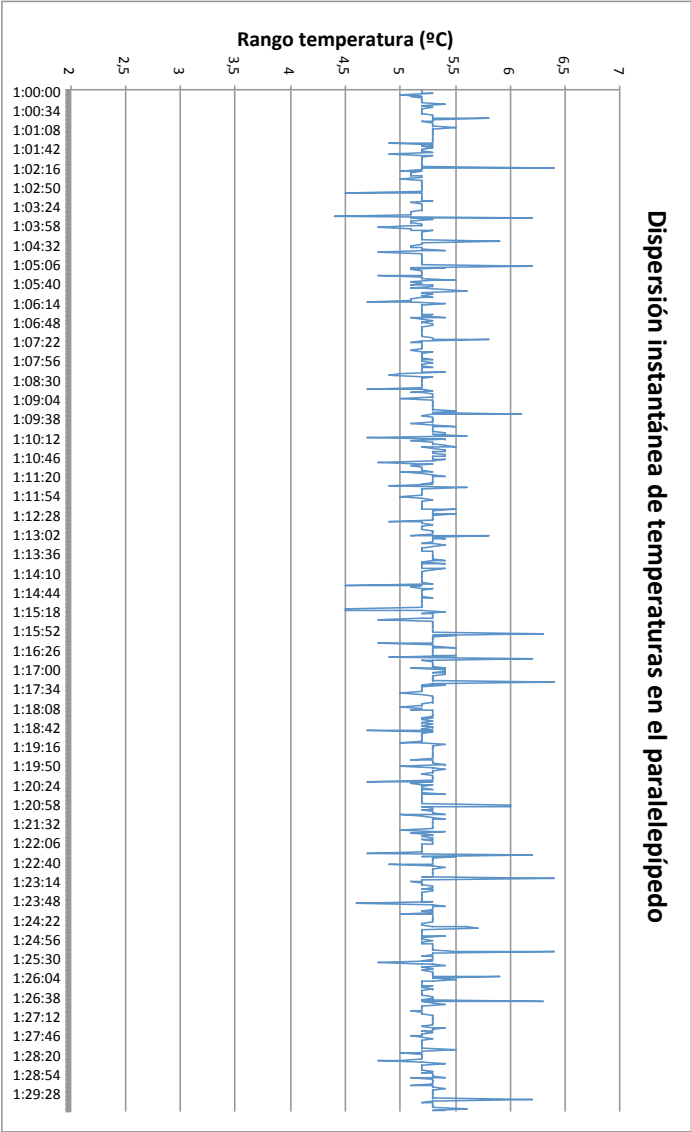
Monitorización de la estabilidad de la temperatura en cada posición durante 30 minutos

Termopar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Mínimo	939,1	941,1	937,9	938,6	939,5	939,4	938,5	935,6	939,2	941,6
Promedio	939,7	941,9	939,0	939,9	940,7	940,6	939,6	936,8	939,9	942,1
Máximo	940,1	942,5	939,8	940,6	941,2	941,3	940,3	937,7	940,4	942,3
Desvío 940°C	-0,3	+1,9	-1	-0,1	+0,7	+0,6	-0,4	-3,2	-0,1	+2,1



A6. 10





A6.3. RESULTADOS TUS PARA CÉLULA 4

Análisis de estabilidad y homogeneidad:

Monitorización de la estabilidad de la temperatura en cada posición durante 30 minutos: rango de lecturas

A6. 12

Termopar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Mínimo	948,5	949,9	946,5	948,5	949,4	948,6	947,9	944,3	948,5	951
Máximo	949,7	951,4	948,4	950,4	951,2	950,5	949,7	946,3	949,6	951,9
Diferencia máxima de temperatura				7,6°C			Criterio: <10°C			Correcto

Análisis de dispersión:

Monitorización de la dispersión instantánea de temperaturas en todo el paralelepípedo durante 30 minutos

Mínimo	5,3°C	Promedio	6,0°C	Máximo	7,1°C
--------	-------	----------	-------	--------	-------

Factor de corrección:

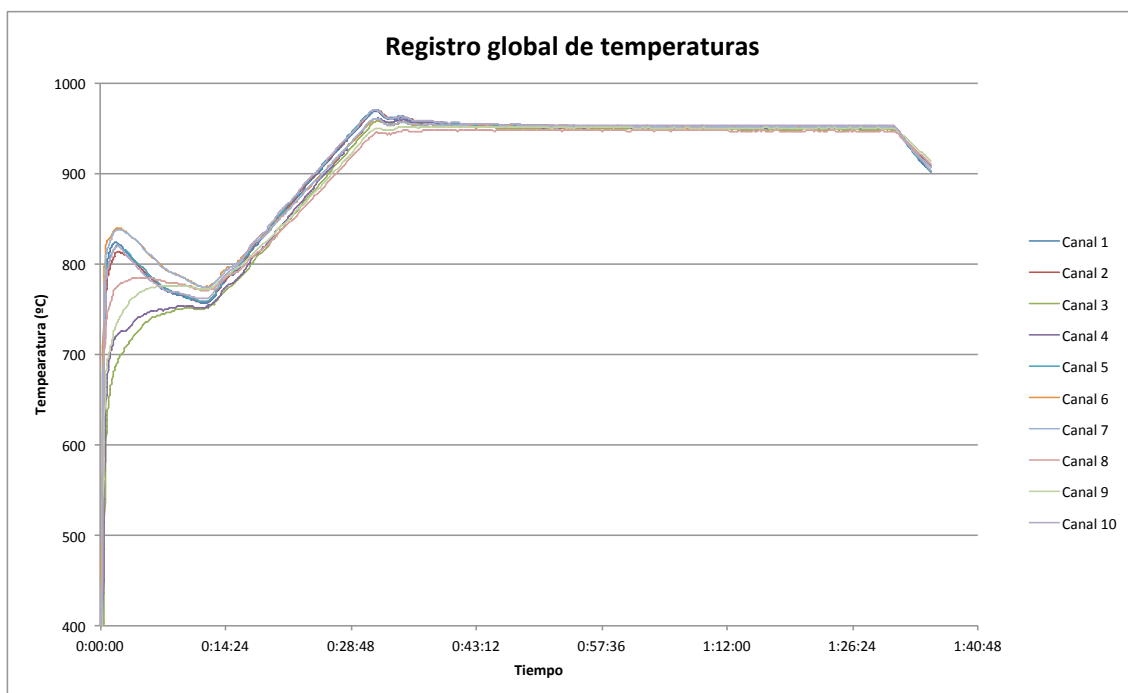
Desviación de la temperatura media observada en cada posición durante 30 minutos respecto a la temperatura de consigna

Termopar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Promedio	949,1	950,8	947,6	949,6	950,4	949,7	948,9	945,5	949,1	951,5
Consigna	940	940	940	940	940	940	940	940	940	940
Desviación	9,1	10,8	7,6	9,6	10,4	9,7	8,9	5,5	9,1	11,5
Media desviación - factor corrección				-9,2°C			Criterio: <±5°C			Incorrecto

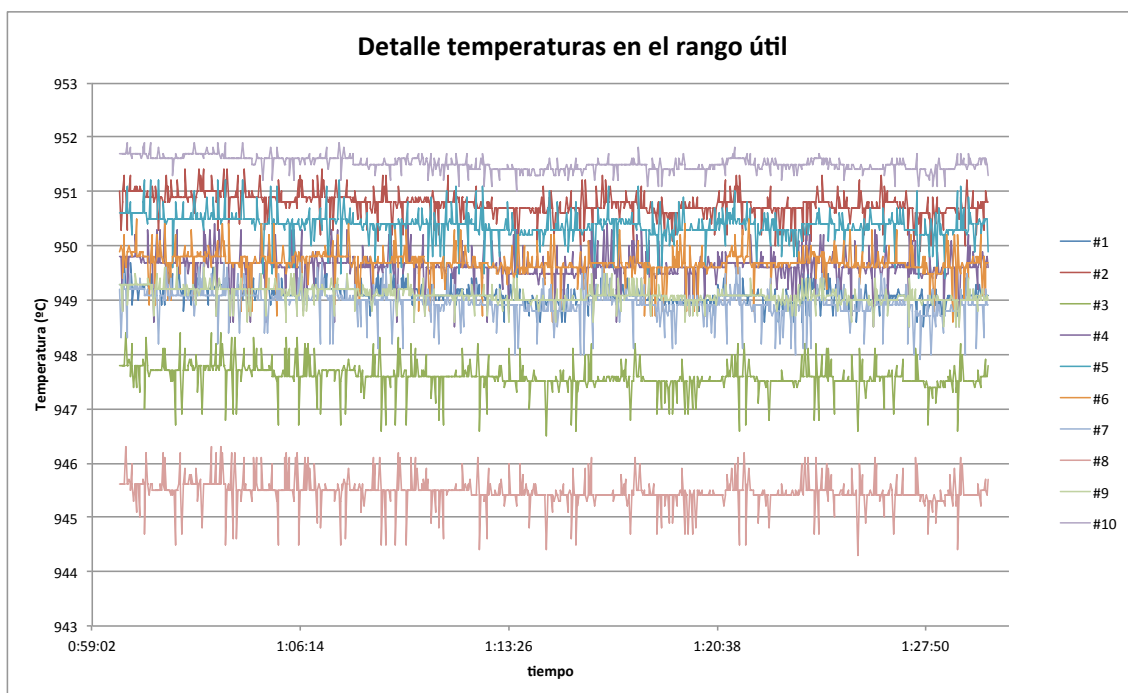
Valores corregidos

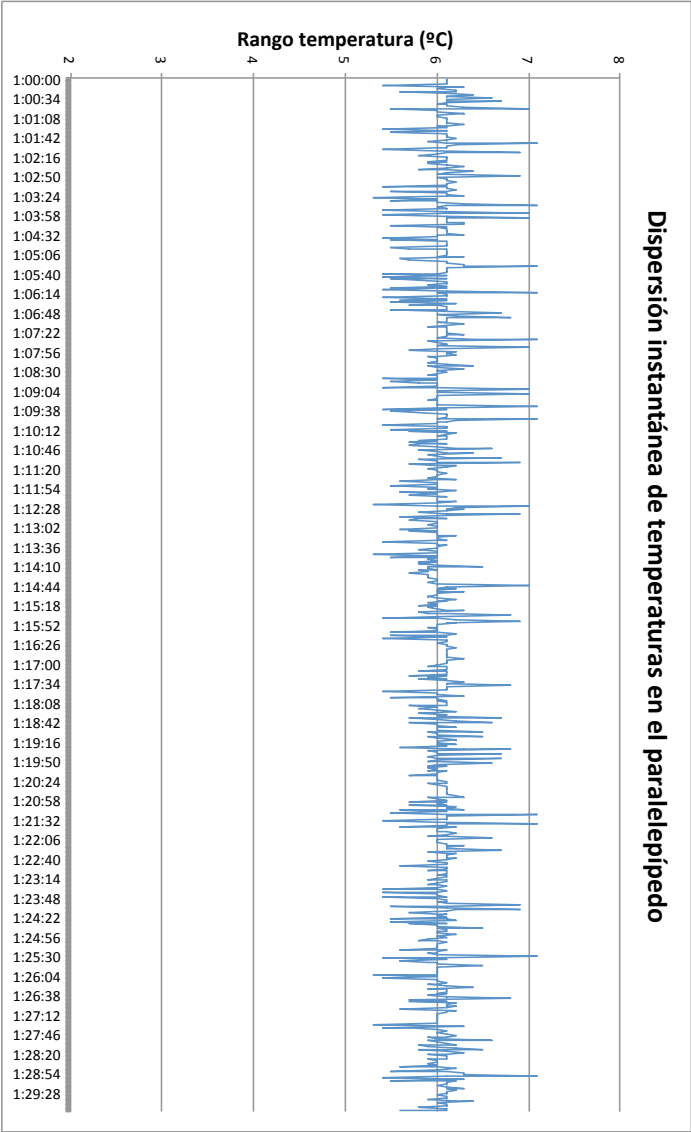
Monitorización de la estabilidad de la temperatura en cada posición durante 30 minutos

Termopar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Mínimo	939,3	940,7	937,3	939,3	940,2	939,4	938,7	935,1	939,3	941,8
Promedio	939,9	941,6	938,4	940,4	941,2	940,5	939,7	936,3	939,9	942,3
Máximo	940,5	942,2	939,2	941,2	942,0	941,3	940,5	937,1	940,4	942,7
Desvío 940°C	-0,1	+1,6	-1,6	+0,4	+1,2	+0,5	-0,3	-3,7	-0,1	+2,3

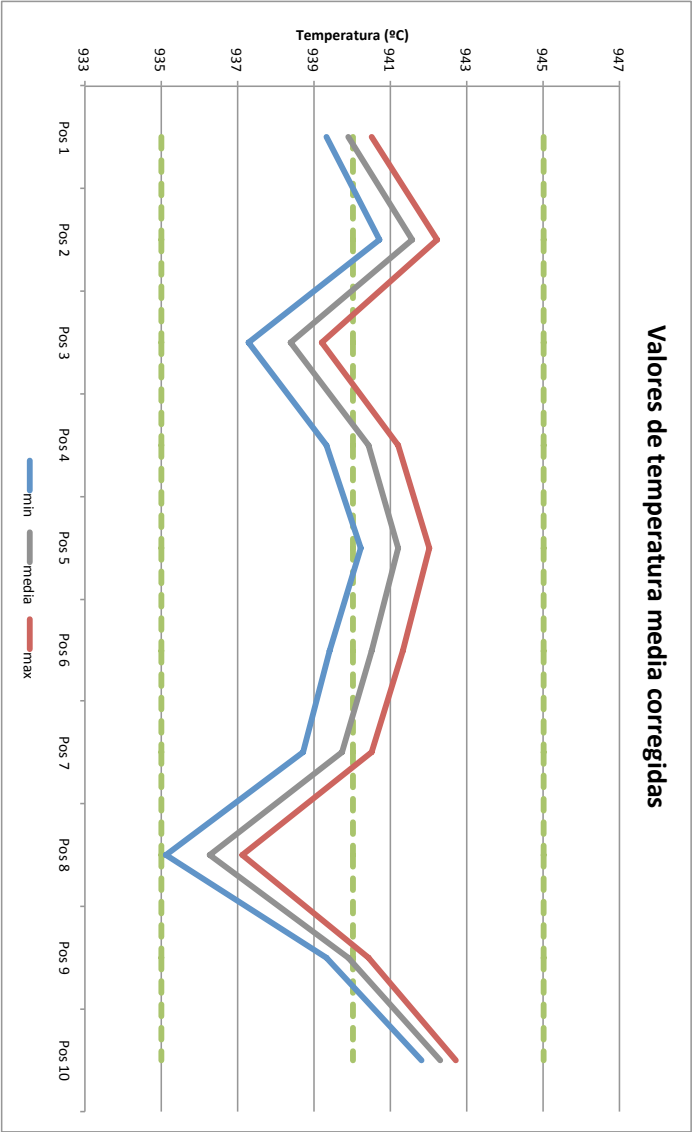


A6. 13





A6. 14



A6.4. RESULTADOS TUS PARA CÉLULA 5

Análisis de estabilidad y homogeneidad:

Monitorización de la estabilidad de la temperatura en cada posición durante 30 minutos: rango de lecturas

Termopar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Mínimo	947,4	949	946,1	947,1	947,6	947,3	946	944,3	946,6	948,9
Máximo	948,8	950,8	948,5	949,7	950	949,5	948,4	946,8	948	950
Diferencia máxima de temperatura				6,5°C		Criterio: <10°C			Correcto	

Análisis de dispersión:

Monitorización de la dispersión instantánea de temperaturas en todo el paralelepípedo durante 30 minutos

Mínimo	3,2°C	Promedio	4,4°C	Máximo	5,6°C
--------	-------	----------	-------	--------	-------

Factor de corrección:

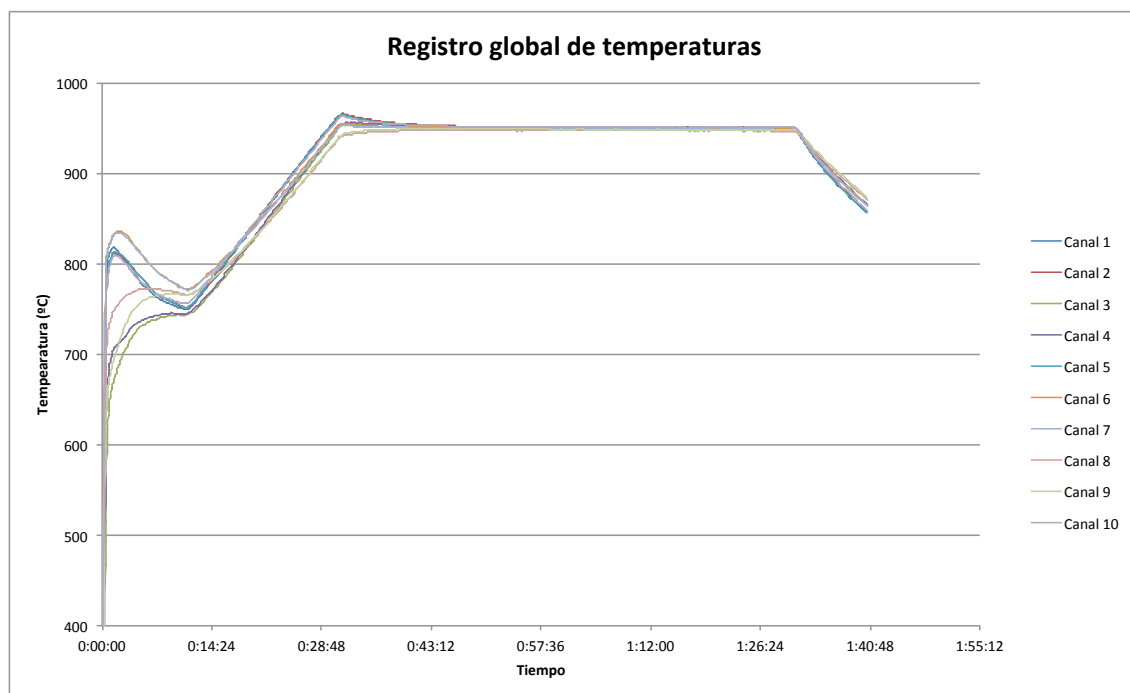
Desviación de la temperatura media observada en cada posición durante 30 minutos respecto a la temperatura de consigna

Termopar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Promedio	948,1	949,9	947,3	948,4	948,8	948,5	947,2	945,5	947,3	949,5
Consigna	940	940	940	940	940	940	940	940	940	940
Desviación	8,1	9,9	7,3	8,4	8,8	8,5	7,2	5,5	7,3	9,5
Media desviación - factor corrección				-8,1°C		Criterio: <±5°C			Incorrecto	

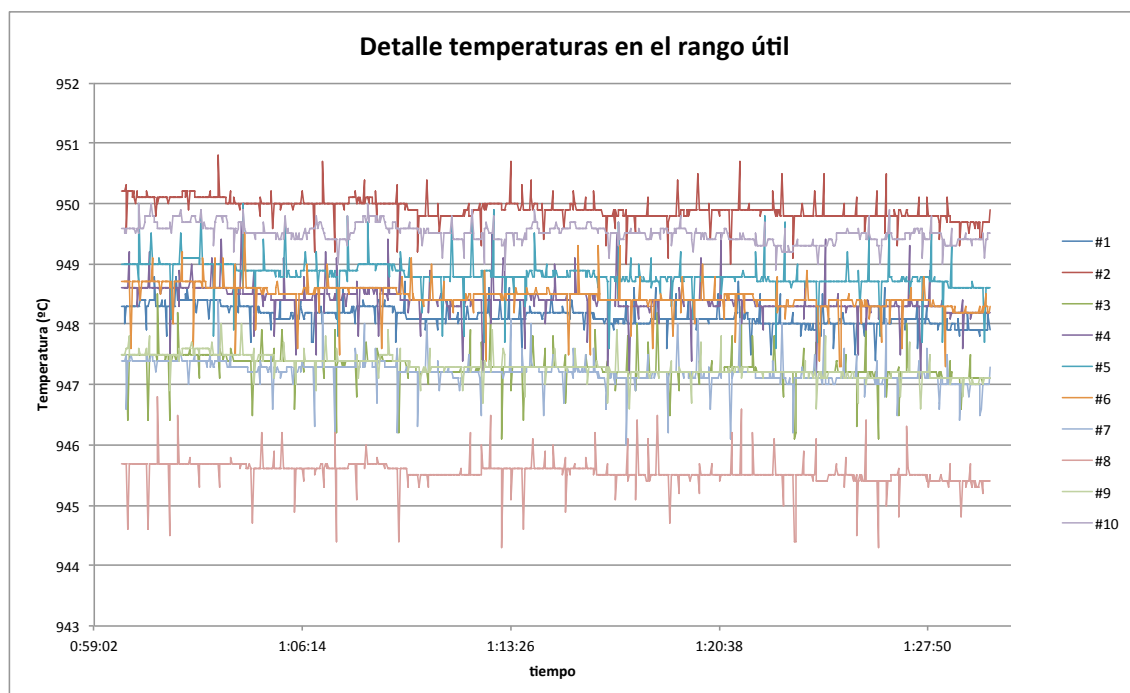
Valores corregidos

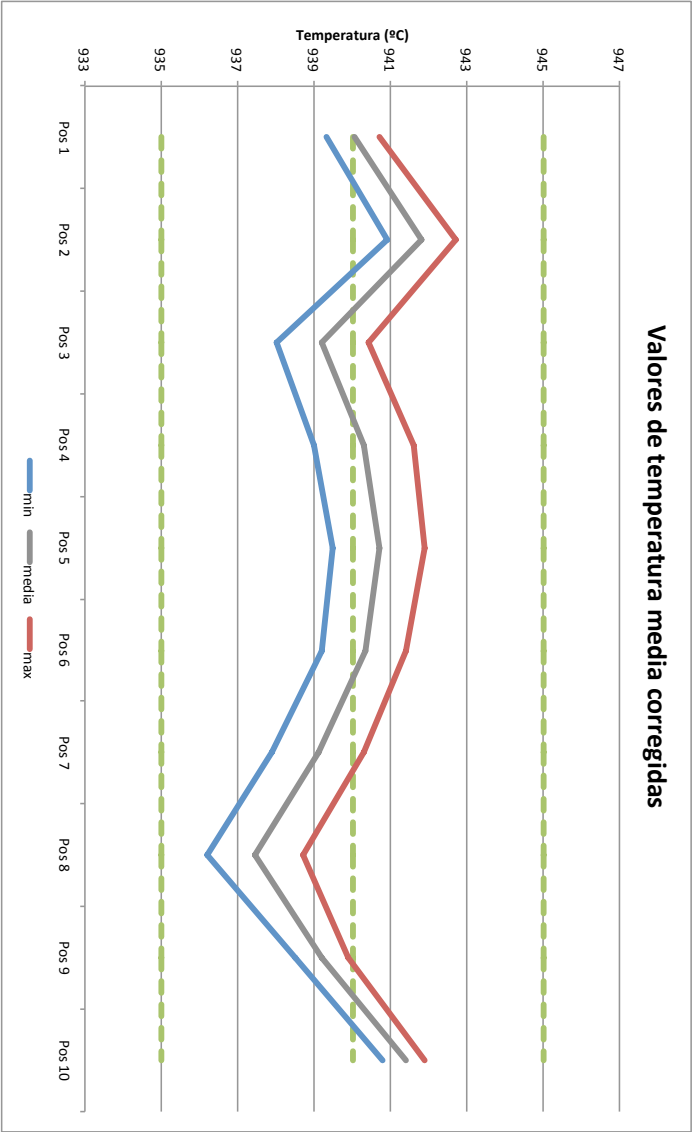
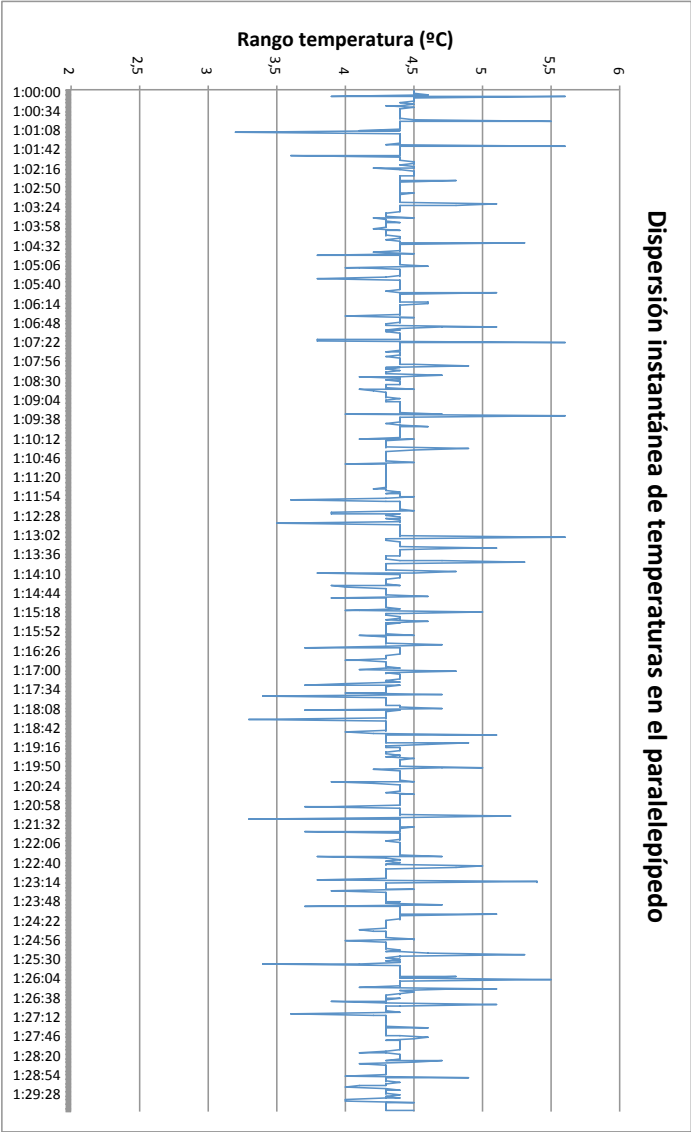
Monitorización de la estabilidad de la temperatura en cada posición durante 30 minutos

Termopar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Mínimo	939,3	940,9	938,0	939,0	939,5	939,2	937,9	936,2	938,5	940,8
Promedio	940,0	941,8	939,2	940,3	940,7	940,4	939,1	937,4	939,2	941,4
Máximo	940,7	942,7	940,4	941,6	941,9	941,4	940,3	938,7	939,9	941,9
Desvío 940°C	0	+1,8	-0,8	+0,3	+0,7	+0,4	-0,9	-2,6	-0,8	+1,4



A6. 16





A6.5. RESULTADOS TUS PARA CÉLULA 6

Análisis de estabilidad y homogeneidad:

Monitorización de la estabilidad de la temperatura en cada posición durante 30 minutos: rango de lecturas

Termopar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Mínimo	945	947,4	944,4	945,4	945,8	946,7	945,4	943,7	945,5	947,4
Máximo	945,9	948,5	945,5	946,7	947,1	948	946,7	945,1	946,5	948,3
Diferencia máxima de temperatura				4,8°C			Criterio: <10°C			Correcto

Análisis de dispersión:

Monitorización de la dispersión instantánea de temperaturas en todo el paralelepípedo durante 30 minutos

Mínimo	2,9°C	Promedio	3,6°C	Máximo	4,1°C
--------	-------	----------	-------	--------	-------

Factor de corrección:

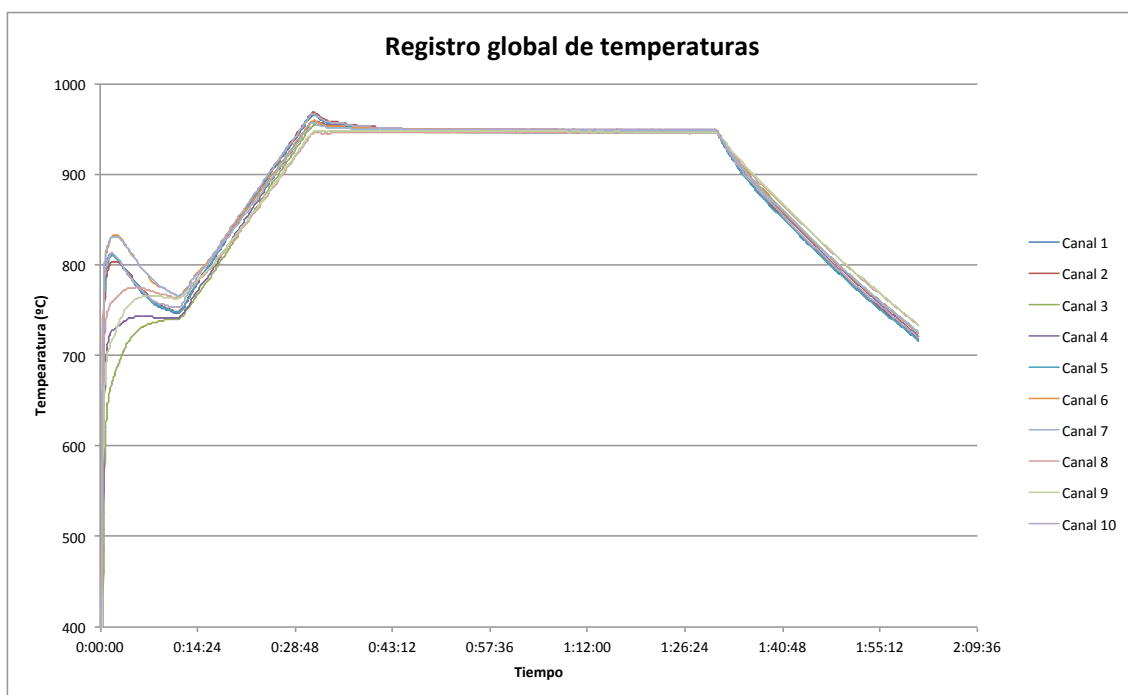
Desviación de la temperatura media observada en cada posición durante 30 minutos respecto a la temperatura de consigna

Termopar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Promedio	945,3	947,8	944,7	945,9	946,2	947,2	945,8	944,2	945,8	947,8
Consigna	940	940	940	940	940	940	940	940	940	940
Desviación	5,3	7,8	4,7	5,9	6,2	7,2	5,8	4,2	5,8	7,8
Media desviación - factor corrección				-6,1°C			Criterio: <±5°C			Incorrecto

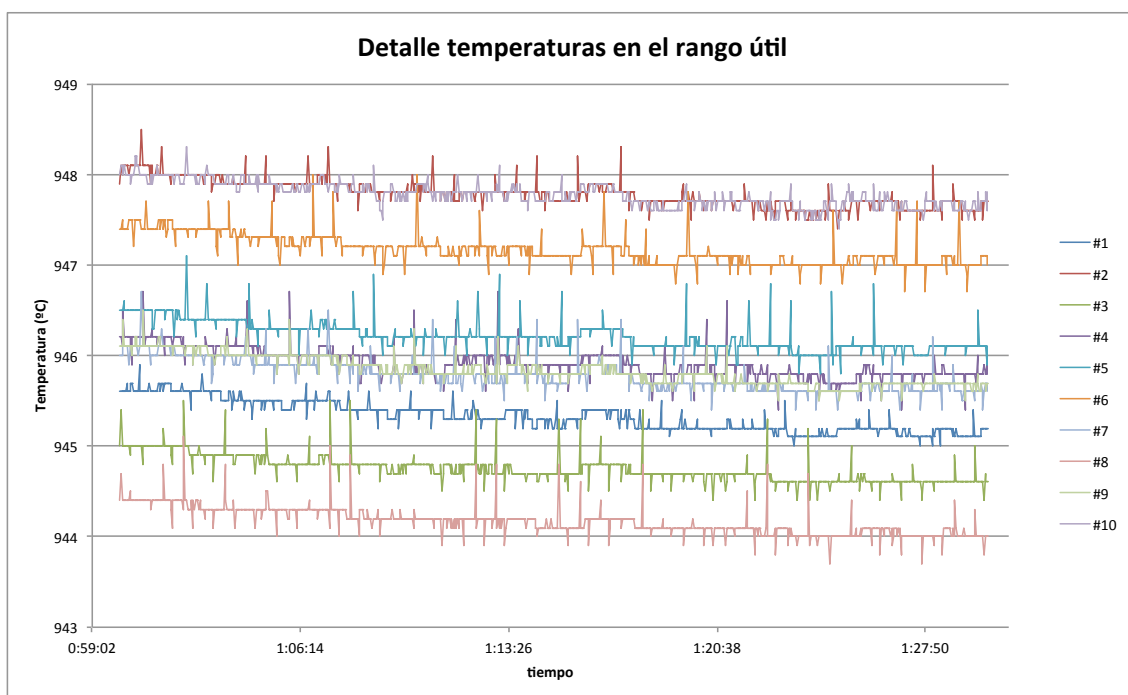
Valores corregidos

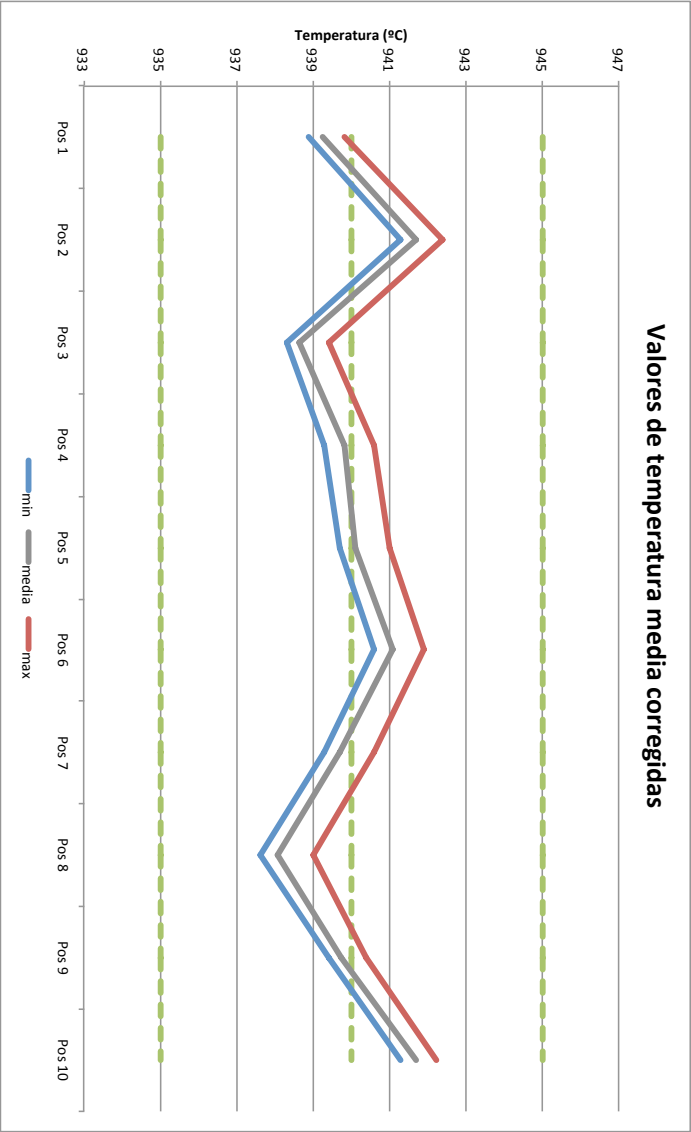
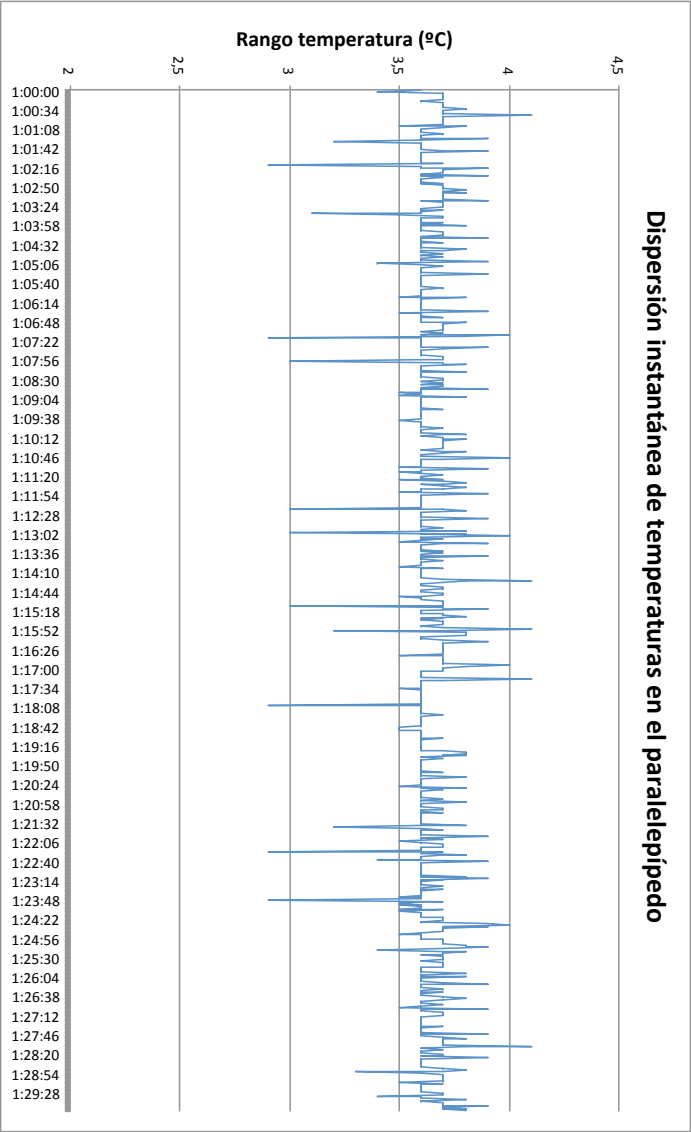
Monitorización de la estabilidad de la temperatura en cada posición durante 30 minutos

Termopar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Mínimo	938,9	941,3	938,3	939,3	939,7	940,6	939,3	937,6	939,4	941,3
Promedio	939,2	941,7	938,6	939,8	940,1	941,1	939,7	938,1	939,7	941,7
Máximo	939,8	942,4	939,4	940,6	941,0	941,9	940,6	939,0	940,4	942,2
Desvío 940°C	-0,8	+1,7	-1,4	-0,2	+0,1	+1,1	-0,3	-1,9	-0,3	+1,7



A6. 19





Final del documento
