

FENOMENOS DE EBULLICION PULSADA
EN REACTORES TIPO PISCINA

AUTORES:
D. G. PARKANSKY
H. T. DE NOTTA

CNEA-Re-207, 1982

FENOMENOS DE EBULLICION
PULSADA EN REACTORES TIPO PISCINA

1.- RESUMEN

El presente trabajo consiste en la determinación experimental de los flujos calóricos que origina la Ebullición pulsada tanto para condiciones de convección natural como para convección forzada para presiones de 1 y 1,5 atm. a distintas temperaturas de pileta.

En todos los casos se observó una primera etapa de desgasificación la que procedía a la ebullición pulsada que como consecuencia de dicha desgasificación se desplazaba hacia flujos calóricos mayores.

Para realizar las experiencias se recurrió a una sección de ensayo de laboratorio que permitió colocarnos en condiciones de un canal de refrigeración del reactor - (ver Apéndice 1).

Los ensayos se realizaron en las siguientes condiciones experimentales:

1 - T pileta : 20°C Tipo de fluido refriger.: Agua liv. sin desgasificar

T Amb. : 23°C P abs : 1,00 atm.

En convección natural y forzada para velocidades de fluido de:

19 cm/seg - 34 cm/seg y 45 cm/seg.

2 - T pileta : 40°C Tipo de fluido : Agua liv. sin desgasificar

T amb. : 23°C P abs : 1,00 atm.

En convección natural y forzada para velocidades de fluido de 20 cm/seg. y 35 cm/seg.

3 - T pileta : 40°C Tipo de fluido: agua liv. sin desgasificar

T amb : 23°C P abs : 1,55 atm.

En convección natural y forzada para una velocidad de fluido de 34 cm/seg.

Las conclusiones obtenidas son las siguientes:

A - Para las 3 condiciones experimentales distintas siempre los ϕ son menores para convección natural.

B - Para una misma presión en todos los casos (convección natural y forzada) los ϕ son mayores para T pileta : 20°C que para T pileta : 40°C (hay un mayor AT, luego mayor eficiencia en la Transf. de calor).

C - Para T pileta : 40°C y P : 1,5 atm. se incrementa ϕ de Eb.pulsada con respecto a T pileta : 40°C y P : 1 atm. debido al aumento en T sat.

D - De correlaciones experimentales (Le Calcul Thermique Des Reacteurs De

////

////

Recherche Refroidis Par EAU) se ve que los ϕ de ebullición pulsada se desplazan a mayores flujos debido a que se trabajó un agua sin desgasificar incrementándose el H en un factor que puede llegar a tres.

2.- INTRODUCCION

El presente trabajo se refiere a reactores de investigación de tipo piscina con elementos combustibles MTR (de placas combustibles). Existen fenómenos críticos que hay que tener en cuenta para el diseño de un reactor pileta.

Para flujos calóricos muy bajos la transferencia de calor se rige por convección en simple fase y los coeficientes de transferencia correspondientes dependerán del régimen de escurrimiento: laminar, transitorio o turbulento.

A medida que se incrementa el flujo calórico aparecen fenómenos que alteran los mecanismos de refrigeración.

A continuación describiremos dichos fenómenos:

Si se aumenta progresivamente el ϕ se puede asistir a la aparición de 3 fenómenos:

- 1) Si el escurrimiento medio en el núcleo es de sentido descendente podrá sobrevenir dentro del canal caliente, una inversión en sentido del escurrimiento con una anulación momentánea de la velocidad. Este fenómeno de inversión de caudal se acompaña de un pico momentáneo de la temperatura de pared.
- 2) A continuación aparece ebullición dentro del canal caliente y el escurrimiento puede volverse oscilante. Este fenómeno se denomina "Ebullición Pulsada".

En la realidad, dado que el agua contiene aire disuelto, previo a la ebullición aparece el fenómeno de desgasificación local del agua en contacto con los elementos combustibles calientes dependiendo el mismo de la presión, la concentración de aire disuelta en el agua y del flujo calórico.

Como ya se mencionó, esta situación favorece notablemente la transferencia de calor de manera que, para aumentos posteriores del flujo, se producen aumentos pequeños de la temperatura de pared en los elementos combustibles.

- 3) Cuando el flujo calórico alcanza un cierto valor, el régimen de ebullición pulsada se acompaña de una elevación importante y permanente de la temperatura de pared, situación que lleva a la fusión de los elementos combustibles (Burn-out)

Aquí se estudiará el flujo umbral de comienzo de la ebullición pulsada para distintas condiciones de T fluido y Presión en convección natural y forzada con velocidades del fluido refrigerante hasta 50 cm/seg.

Estas velocidades comprenden el rango de trabajo del Reactor RA-6.

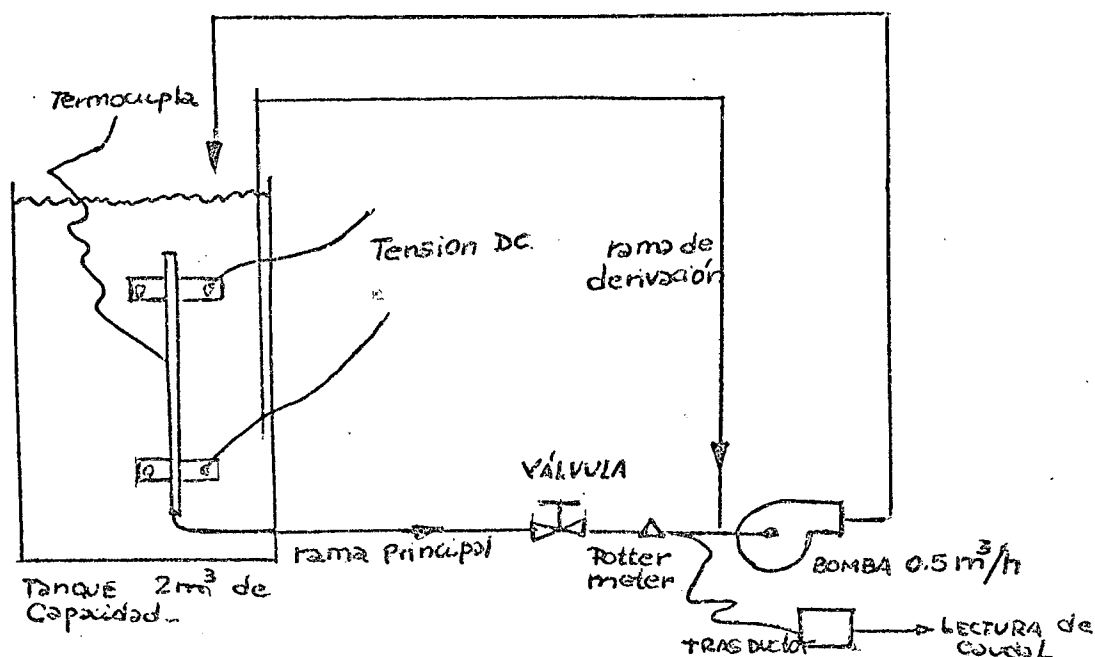
////

////

De experiencias realizadas en Francia surge que el límite del rango de ocurrencia de la ebullición pulsada se halla entre los 50 y 100 cm/seg. dependiendo de la geometría, presión y T entrada al canal.

En nuestro caso limitaciones de índole experimental no nos permitieron analizar velocidades superiores a los 50 cm/seg.

4.- DESCRIPCION DEL DISPOSITIVO DE ENSAYO



El dispositivo de ensayo consta de una sección de ensayo calentada por efecto joule. Por la parte inferior dicha sección está conectada a una cañería donde se intercala una válvula y un medidor de caudal (Potter-meter). El sistema recibe el aporte de una rama de derivación utilizada para poder regular el caudal que pase por la rama principal.

Luego el circuito consta de una bomba que recicla el fluido al tanque que tiene una capacidad de 2 m³. - La utilización de la Sección de ensayo se justifica en el apéndice 1.

5.- RESULTADOS EXPERIMENTALES

El ensayo se efectuó en las siguientes condiciones:

T pileta : 20°C Fluido : agua liviana

T ambiente: 23°C

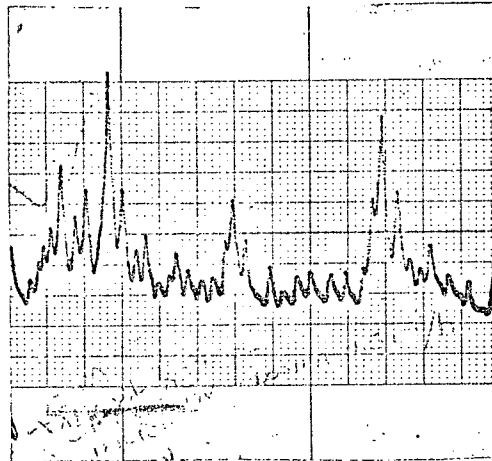
P abs.: 1 atm : 0,98 bars : 1,033 kg/cm²

5.1.- CONVECCION NATURAL

////

////

Se aplicó tensión y primeramente se observó desgasificación para luego notarse la aparición de la ebullición pulsada a una $\phi : 19,7 \text{ W/cm}^2$. En este punto se nota que la temperatura de pared "plateada" indica máximos que son periódicos y que se obtienen luego de ver el fenómeno de expulsión a través de un registrador Beckman. Si se aumenta el ϕ la frecuencia aumenta y logicamente la altura de los picos.



5.2.- CONVECCION FORZADA

Las condiciones de operación son iguales a las anteriores salvo que el fluido aquí circula por el circuito a una velocidad de 19 cm/seg. en forma descendente. Cabe destacar que esta velocidad es regulada mediante la utilización de la válvula intercalada en el dispositivo de ensayo.

Observaciones:

a un $\phi : 8 \text{ W/cm}^2$ se observa que la velocidad del agua que circula a través de la sección de ensayo sube a 21 cm/seg.

a un $\phi : 15 \text{ W/cm}^2$ la lectura de velocidad indica 23 cm/seg.

a un $\phi : 16,5 \text{ W/cm}^2$ se observan pocas burbujas y la velocidad se mantiene en 23 cm/seg.

a un $\phi : 18 \text{ W/cm}^2$ comienzan a verse burbujas de vapor que circulan por el circuito en forma apreciable.

a un $\phi : 20 \text{ W/cm}^2$ la velocidad indicada por el Potter-meter es de 24 cm/seg y se ven muchas burbujas.

////

////

a un ϕ : 21,8 w/cm² se observa una cantidad muy importante de burbujas por la manguera, y comienza a verse una oscilación cada vez más acentuada en la lectura de caudal precisamente como resultado de esas burbujas.

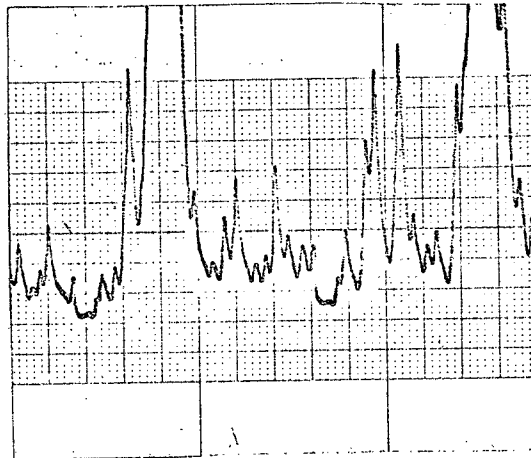
Con ϕ : 30 w/cm² la lectura alcanza el valor cero para luego subir algo con un período regular. En este momento se lleva a Ebullición Pulsada. (ver figura 1).

- Para condiciones similares a las anteriores pero velocidad de 34 cm/seg. en forma descendente se observan los siguientes fenómenos:

ϕ : 26 w/cm² se ven burbujas que circulan por la cañería - La lectura del caudal baja a 32 cm/seg.

ϕ : 34,8 w/cm² se ven mayor cantidad de burbujas y la velocidad baja a 31 cm/seg.

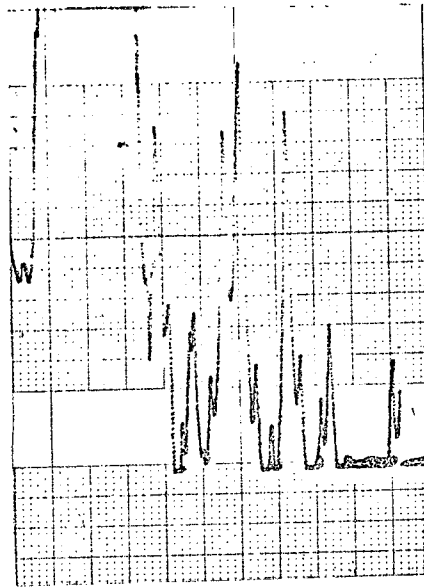
ϕ : 35,6 w/cm² aparece ebullición pulsada y la lectura cae rápidamente a cero en lo referente a caudal.



- La experiencia se realiza en las mismas condiciones pero velocidad de 45 cm/seg.

El fenómeno es repetido apareciendo la Ebullición pulsada a ϕ : 47,7 w/cm².

////



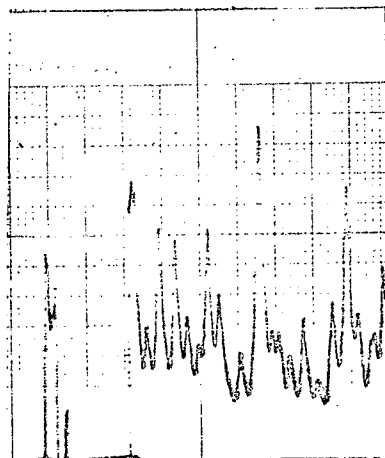
- El ensayo también se realizó bajo las siguientes condiciones:

T pileta : 42°C T amb. : 23°C

P abs. : 1 atm : 0,98 bars : 1,033 kg/cm².

5.3.- CONVECCION NATURAL

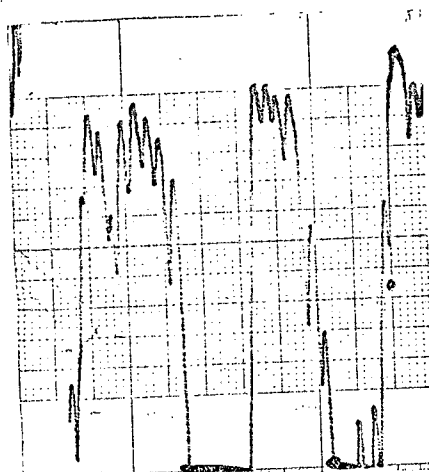
Se observarán en primer lugar burbujas de desgasificación y luego a ϕ : 14, se produjo la Ebullición pulsada.



5.4.- CONVECCION FORZADA

Velocidad de circulación de fluido: 20 cm/seg.

En estas condiciones se observa primero desgasificación como en todos los casos anteriores y luego Ebullición Pulsada a ϕ : 27,8 w/cm².

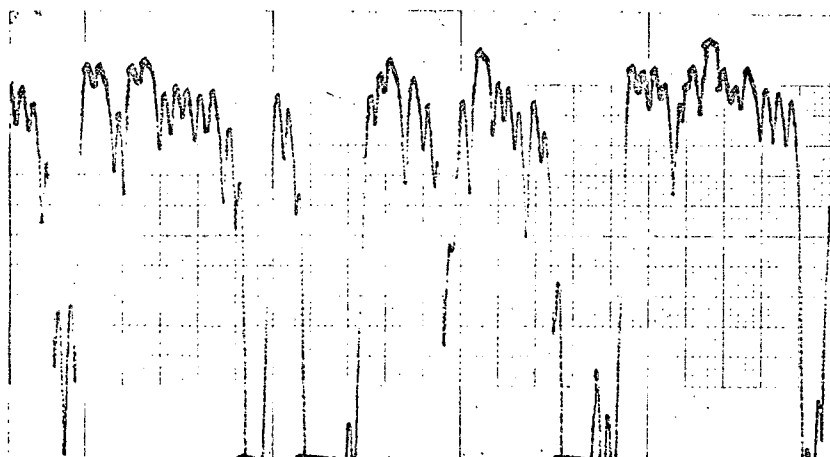


- Velocidad 35 cm/seg. se observa Ebullición pulsada a ϕ ; 32 w/cm². Finalmente se realizó la experiencia con las siguientes condiciones de operación:

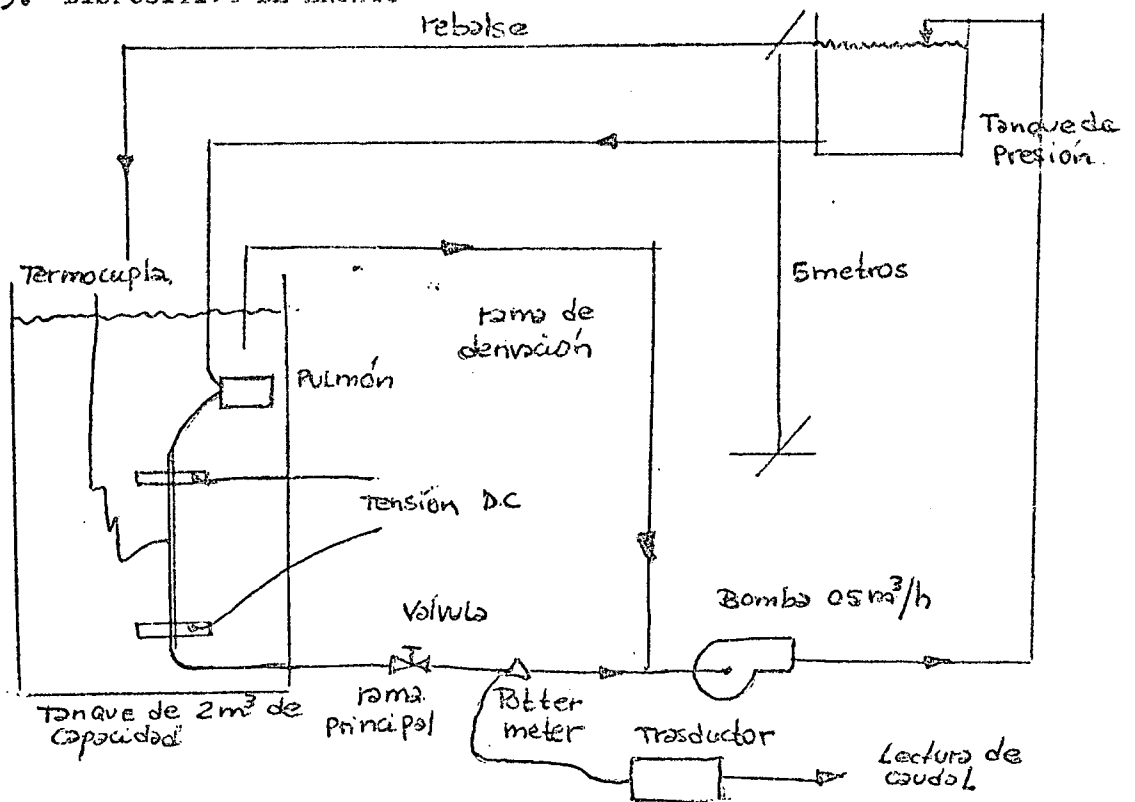
T piletta: 42°C

T amb.: 23°C

P abs. : 1,5 atm : 1,47 bars : 1,549 kg/cm².

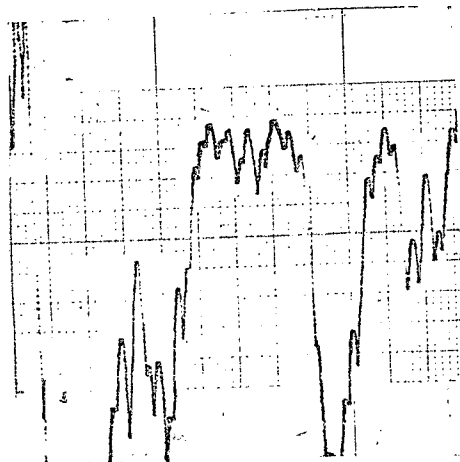


5.5.- DISPOSITIVO DE ENSAYO



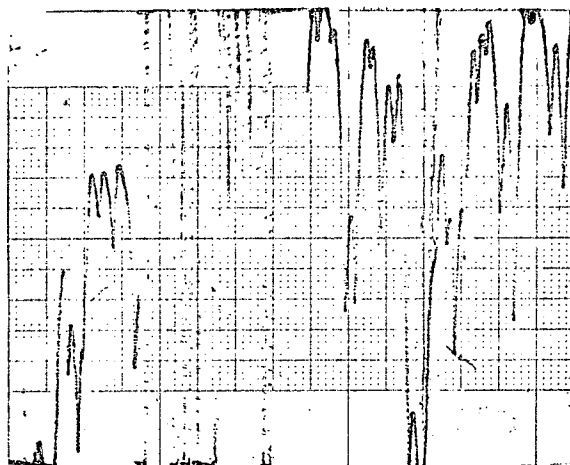
5.6.- CONVECCION NATURAL

En estas condiciones de operación como es lógico se nota un retraso en las condiciones de desgasificación (Ley de Henry) y la ebullición pulsada se logra con $\phi : 27 \text{ w/cm}^2$.



5.7.- CONVECCION FORZADA

El único punto que fué posible tomar fué para una velocidad de 34 cm/seg. obteniéndose para ebullición pulsada $\phi : 59,5 \text{ w/cm}^2$.



5.8.- DATOS SOBRE SECCION DE ENSAYO UTILIZADA.

Este trabajo fué realizado sobre una sección de ensayo de las siguientes características:

D ext : 0,635 cm.

Sup. pasaje de H_2O Sp : 0,24 cm^2 .

$D_i : D_h : 0,553 \text{ cm.}$

Perímetro calef.: Perímetro Mojado: 1,74 cm

Esp. de pared: 0,040 cm.

Sup. calefactora Sc : 107 cm^2 .

Largo util : 61,5 cm.

$\phi : 0,165 \text{ V}^2 \text{ (w/cm}^2\text{.)}$

Largo total: 65,5

6.- DISCUSION Y CONCLUSIONES:

6.1.- Analizando los resultados obtenidos se vé que en los 3 casos distintos para convección natural se obtienen menores ϕ para ebullición pulsada.

6.2.- En todos los casos se vé que para 20°C de T piletta los ϕ son mayores que para una T piletta: 40°C siempre comparado a P abs: 1 atm.

6.3.- Para 40°C y 1,5 atm se vé un incremento en el ϕ con respecto al obtenido a 40°C y 1 atm. absoluta.

////

6.4.- Los resultados obtenidos siguen una secuencia que muestra un aumento en los ϕ como consecuencia de la aparición de desgasificación que en todos los casos incrementa los h de transferencia en una magnitud de hasta 3 veces el original. Esta circunstancia provoca un desplazamiento de la ebullición pulsada a ϕ mayores.

6.5.- En las condiciones de 20°C y 1 atm. los valores de ϕ para ebullición pulsada son mayores que para 40°C y 1 atm. tanto en condiciones de convección natural como para las mismas condiciones de convección forzada debido a que la extracción de calor es más efectiva cuanto menor es la Temperatura del refrigerante.

6.6.- Comparando lo ϕ para 42°C y 1 atm. y 42°C y 1,5 atm. el hecho de que los flujos sean mayores en el caso de mayor presión se justifica por el hecho de que al aumentar la presión aumenta también la T_{sat} .

6.7.- En todos los casos antes de llegar al fenómeno de ebullición pulsada se alcanza la desgasificación.

Existen correlaciones experimentales que permiten determinar el punto donde comienza la desgasificación

$$T_p : T_{Sat Ad} + 1,542 \phi^{0,46} \quad P: 1 \text{ atm.}$$

donde $\phi : (w/cm^2)$ $T_{Sat Ad}$: Temperatura donde para una dada presión y concentración de aire disuelto en agua a la cual tiene comienzo la desgasificación.

Por otro lado tenemos $T_p : T_{fluido} + \frac{\phi}{h}$

donde h : coeficiente de transferencia de calor en w/cm^2 .

En el punto donde se cortan ambas ecuaciones es el ϕ donde tiene comienzo la desgasificación.

Existe otra correlación empírica para la aparición de doble fase para $P : 1 \text{ atm.}$ para agua desgasificada.

$$T_p : 100 + 4,57 \phi^{0,35}$$

Nuevamente en el punto donde se corta esta ecuación con $T_p : T_{fluido} + \frac{\phi}{h}$ es el punto en que aparece la doble fase.

En nuestra experiencia se ve que los valores de ϕ encontrados para el comienzo de la ebullición pulsada son mayores que las obtenidas de la intersección de estas dos curvas.- (Ver Gráfico 1)

APENDICE 1:

1 -- Justificación Teórica de la validez de la utilización de una sección de ensayo en las experiencias Termohidráulicas.

1A. Justificación hidráulica:

En este punto se analizan los tres términos del balance de cantidad de movimiento, es decir el término AP por fricción $(\frac{aP}{aZ})_F$; el término convectivo $A (\frac{G^2}{P})$ y el término de elevación $PgZ \sin \phi$.

1A1. Término de AP por fricción

$$\Delta P_F : \lambda \frac{L}{D_H} \epsilon \rho \frac{V^2}{2g}$$

$$\Delta P_F : \lambda \frac{L}{D_H} \frac{\rho^2}{P} \frac{V^2}{2}$$

$$\Delta P_F : \lambda \frac{L}{D_H} \frac{G^2}{2\rho} \quad \text{donde} \quad \lambda = \frac{0.316}{Re^{0.25}}$$

Como se puede observar para el caso de trabajar en simple fase (solo fase líquida) la analogía con un canal de refrigeración del reactor es válida con solo conservar la relación $\frac{L}{D_H}$ para un mismo fluido y para idénticos caudales máxicos G.

1A2. En el caso de encontrarnos en doble fase en tubos lisos el tratamiento es el siguiente:

$$\Delta P_F : \lambda_{TP} \frac{L}{D_H} \frac{G^2}{2\rho_m}$$

definiendo

$$\frac{1}{\rho_m} : V_v \times (1-x) \quad V_g : V_g (1 + x \frac{(V_v - V_g)}{V_g})$$

$$\lambda_{TP} : \frac{0.316}{Re_{TP}^{0.25}} \quad \text{donde} \quad Re_{TP} : \frac{G D_H}{\mu}$$

$$\bar{\mu} = \mu_v x + \mu_l (1-x)$$

$$Re_{TP} = \left(\frac{G D_H}{\bar{\mu}} \right) \frac{\mu_l}{\mu} \quad \therefore \quad Re_{TP} = Re_{sp} \left(\frac{\mu_l}{\bar{\mu}} \right)$$

$$Re_{TP} = Re_{sp} \left[\frac{\mu_l}{\mu_v x + \mu_l (1-x)} \right] \quad Re_{TP} = Re_{sp} \left[\frac{1}{1 + x \left(\frac{\mu_v - \mu_l}{\mu_l} \right)} \right]$$

$$\lambda_{TP} = \lambda_{sp} \left[1 + x \left(\frac{\mu_v - \mu_l}{\mu_l} \right) \right]^{0.25}$$

$$\Delta P_F = \lambda_{sp} \frac{L}{D_H} \frac{G^2}{2} V_g \left[1 + x \left(\frac{V_v - V_g}{V_g} \right) \right] \left[1 + x \left(\frac{\mu_v - \mu_l}{\mu_l} \right) \right]^{0.25}$$

Para el caso de doble fase (fase líquida y fase vapor que coexisten) se observa que la analogía es válida conservando los parámetros mencionados para el caso de simple fase y además operando a la misma presión pues sólo en ese caso la fracción de vapor formada (título termodinámico) será la misma. Finalmente concluimos que tanto para simple fase o doble fase conservando los parámetros mencionados la analogía es válida para el caso del AP_p pudiéndose extrapolar los resultados obtenidos.

TERMINO CONVECTIVO

A $\left(\frac{G^2}{P}\right)$ Para simple fase la validez de la analogía es inmediata, y para doble fase hay que conservar también la Presión ya que debemos sustituir P por P_{om} que depende de x que a su vez es función de P .

Cumpliendo estos requisitos es perfectamente aceptable la analogía en este término.

TERMINO DE ELEVACION:

$Z\rho g$ sen ϕ Tanto en simple fase como doble fase este término se puede correlacionar en forma correcta manteniendo las mismas consideraciones adoptadas para el término convectivo.

Con el análisis precedente podemos concluir diciendo que basamos la validez de los resultados obtenidos con nuestra sección de ensayos con solo contemplar los siguientes parámetros:

- A - Trabajar con el mismo fluido
- B - Trabajar a igual presión.
- C - Mantener la relación L/DH
- D - Trabajar en los mismos caudales máscicos G .

2A. JUSTIFICACION TERMICA

2A1. Baláncé térmico

$$AH : \frac{Pot}{W} : \frac{\phi P_c L_c}{\rho Vel Sp} : \frac{4 \phi P_c}{Vel \rho 4 Sp} L_c.$$

$$AH : \frac{4 \phi (L_c)}{G D_c} : C_p (T_{sat} - T_1) + X \lambda$$

En simple fase el Balance térmico sobre la sección de ensayo es válido para el canal de refrigeración de un reactor piscina asegurándonos de contemplar los siguientes parámetros:

- A - Trabajar con el mismo fluido
- B - Trabajar a igual presión a los efectos de asegurar T_{sat} .
- C - Mantener la relación L_c/D_c .
- D - Trabajar en los mismos caudales máscicos G .
- E - H_e (Entalpía de entrada)

Para el caso de doble fase a las consideraciones anteriores hay que sumarle igual título termodinámico de vapor, con lo cual queda perfectamente definida la analogía.

242. EVOLUCION DE TEMPERATURA DE PARED

Para el régimen turbulento, la correlación utilizada es la siguiente:

$$h = \frac{k}{D_H} \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.4} \text{ donde } \text{Re} = \frac{G D_H}{\mu} \quad \text{Pr} = \frac{C_p \mu}{k}$$

$$h = \frac{k}{D_H} \frac{G^{0.8} D_H^{0.8}}{\mu^{0.8}} \cdot \frac{C_p^{0.4} \mu^{0.4}}{k^{0.4}} \quad h = K(T) \frac{Vel^{0.8}}{D_H}$$

$$\phi = h(T_P - T_\ell)$$

$$T_P = T_\ell + \frac{\phi}{h}$$

En simple fase habrá que considerar Vel , D_H , Te y ϕ contemplando estos parámetros para el mismo fluido concluimos que la analogía es válida. En doble fase los parámetros a considerar son: G , D_H , Te , ϕ y P , con lo cual nuevamente la analogía es válida.

De las justificaciones hidráulicas y térmicas se concluye que para los resultados termohidráulicos obtenidos en sección de ensayo sean extrapolables a un canal de refrigeración de un reactor tipo piscina es necesario contemplar los siguientes parámetros:

- 1 - Trabajar con el mismo fluido.
- 2 - Trabajar a igual presión.
- 3 - Mantener la relación L_c/D_c .
- 4 - Mantener la relación L/D_u .
- 5 - Trabajar con iguales caudales máxicos G
- 6 - Trabajar con iguales ϕ
- 7 - Trabajar con igual Te .

EVOLUCION CUALITATIVA EN EL TIEMPO DE LA TEMPERATURA DE
PARED PARA DISTINTOS FLUJOS CALORICOS UTILIZADOS.

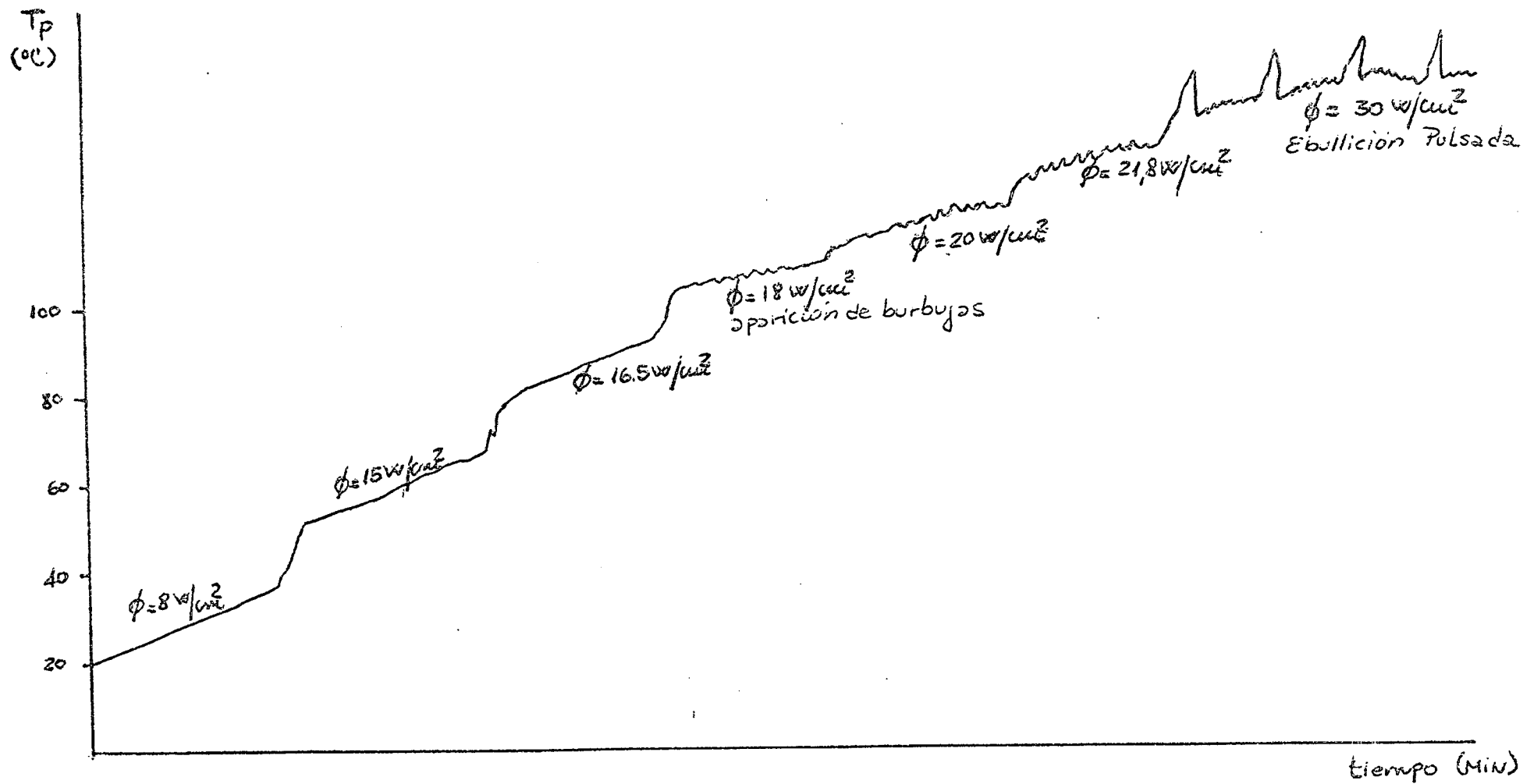


FIGURA 1

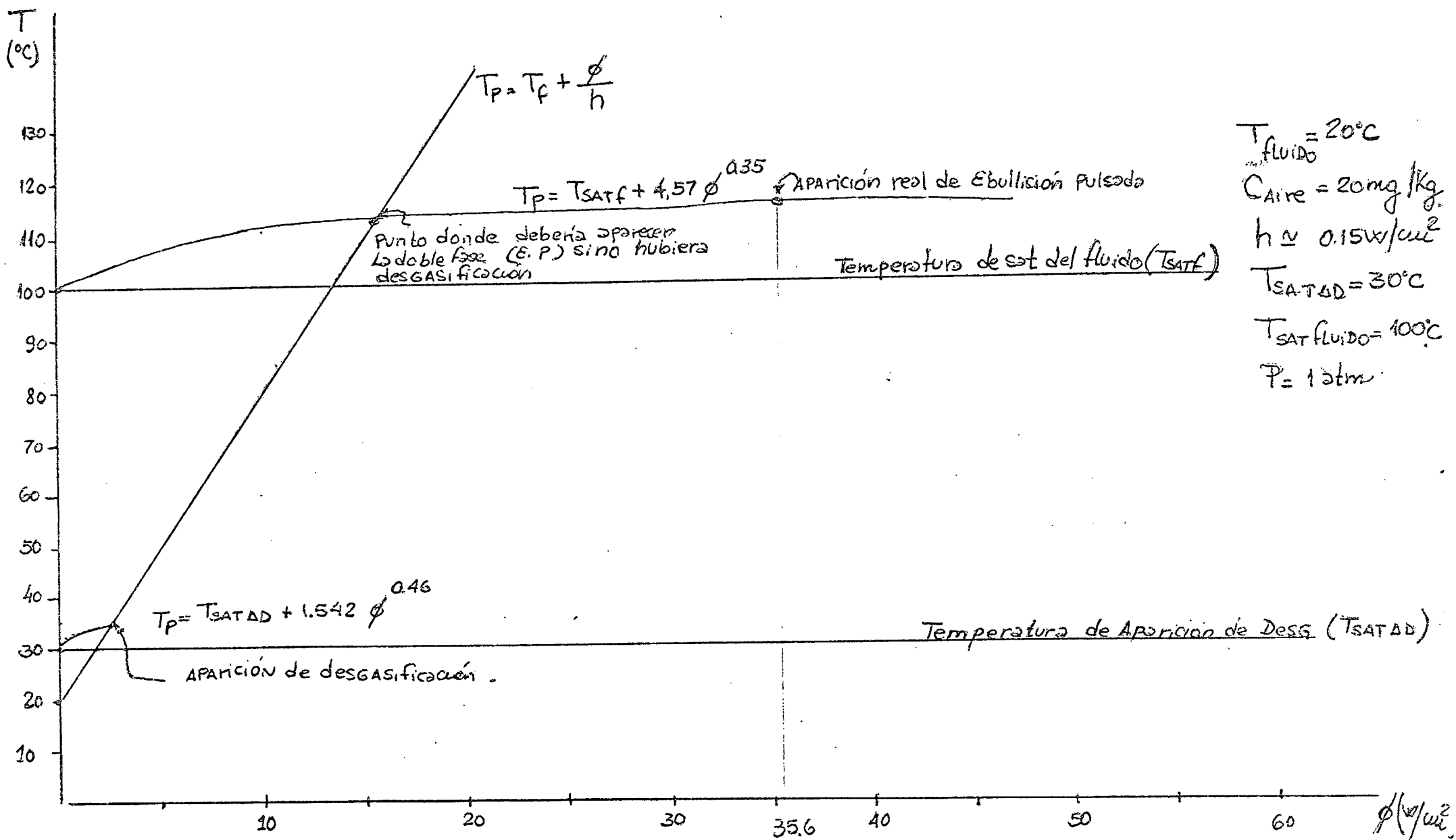


GRAFICO I

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. ANALISIS TERMICO DE REACTORES DE INVESTIGACION TIPO PISCINA REFRIGERADOS CON AGUA A BAJA VELOCIDAD -- D. PARKANSKY -- A.C. VERTULLO -- CNEA RE 167.
2. LE CALCUL THERMIQUE DES REACTEURS DE RECHERCHE REFROIDIS PAR EAU -- Serge FABREGA -- Centre d'Etudes Nucleaires de Grenoble -- Rapport CNEA-R 4114.
- 3 -- OSIRIS -- ETUDES DE SURETE DE LA PUISSANCE THERMIQUE EXTRACTIBLE EN CONVECTION NATURELLE -- DEUXIEME PARTIE -- Ph Vernier -- Centre d'Etudes Nucleaires de Grenoble -- NOLE TT N° 181.