

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

11161
4

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN

**ANÁLISIS DE EFICIENCIA DE UNA MAQUINA DE
CALENTAMIENTO DE FLUIDOS BASADO EN EL
PRINCIPIO DE CAVITACIÓN**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE :

MAESTRO EN INGENIERÍA METALMECÁNICA

P R E S E N T A

JUAN LEOBARDO SÁNCHEZ REYES

ASESOR : DR. ANDRES HERRERA V.

CUAUTITLAN IZACLLI , ESTADO DE MÉXICO 2002.

D



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Índice

	Número de página
I.- Resumen.	2
II.- Introducción.	3
III.- Antecedentes.	5
3.1 Definición y tipos de Cavitación.	5
3.2 Cavitación Hidrodinámica.	7
3.3 Generación de ondas de choque.	7
3.4 La solución de Fujikawa y Akamatsu.	8
3.5 Ebullición: Burbujas o cavidades unidas a la pared de recipientes.	11
3.6 Burbujas de Cavitación en proceso incipiente sumergido en agua.	14
3.7 Cavitación en fluidos	22
3.8 Descripción de la cavitación. Nucleación y límites de cavitación.	24
3.9 Control de la cavitación.	25
3.10 Eficiencia Térmica	28
3.11 Historial del desarrollo de Unidades de calentamiento por medio de agitación y/o cavitación.	29
3.12 Descripción general de la unidad de calentamiento de fluidos.	31
IV.- Trabajo Experimental	33
4.1 Método de prueba.	33
4.2 Condiciones del equipo.	33
4.3 Variables a medir e información complementaria.	34
4.4 Condiciones generales de medición.	34
4.5 Determinación de la eficiencia.	35
4.6 Diagrama Esquemático.	36
4.7 Descripción de los procedimientos de prueba.	37
4.8 Algunas consideraciones referentes al registro de potencia de entrada.	43
V.- Resultados.	41-50
VI.- Discusión	51-53
VII.- Conclusiones.	54
VIII- Bibliografía.	55
Anexo I.- Instrumentos y equipo de medición.	57
Anexo II.- Presión de Saturación Ps del vapor de agua a diversas Temperaturas ts	59

I.- Resumen.

El trabajo aquí presentado tiene como objetivo analizar la eficiencia de una máquina de calentamiento de fluidos basado en principio de cavitación, para comprobar la afirmación por parte de sus desarrolladores de que máquinas de este tipo son más de 100 % eficientes, describiendo las ventajas sobre las formas actuales de calentamiento, haciendo énfasis en el alto rendimiento termodinámico del mismo (98%). La unidad desarrollada utiliza a la cavitación (Generación de burbujas y ondas de choque) para la producción de calentamiento a diferencia de equipo eléctrico o mecánico que utilizan combustibles fósiles. Este efecto de generación de ondas de choque es comúnmente llamado "martilleo" y usualmente se considera como un problema que requiere ser corregido.

La cavitación es un fenómeno destructivo, pero si se controla puede ser usado, -como en este caso- para calentar fluidos, o para mezclar fluidos. El campo relacionado con el desarrollo de procesos en los cuales se requiera el calentamiento de fluidos (en especial el agua) es muy extenso, además de que actualmente se cuenta con unidades que requieren combustibles fósiles y estos equipos tienen un índice de eficiencia de alrededor del 84 %. Los actuales medios de calentamiento transfieren calor desde una superficie metálica hacia los líquidos a altas temperaturas. Estos procesos causan diferenciales de temperatura muy grandes entre la fuente de calentamiento y el fluido creando generalmente en las superficies metálicas oxidación e incrustaciones sobre las superficies expuestas al calor. El tipo de equipo requerido actualmente para el calentamiento de fluidos es de origen extranjero y tanto el costo del equipo como el mantenimiento del mismo son elevado. El trabajo aquí presentado es una propuesta para generar una unidad con resultados confiables, fácil construcción manejo y mantenimiento simple, bajo costo y desarrollo nacional.

El presente documento describe el análisis de eficiencia de una unidad utilizada para el calentamiento de fluidos y más particularmente para una unidad en donde un miembro rota y únicamente el líquido se calienta pudiendo ser utilizada como otra opción viable para calentar fluidos.

II).- Introducción.

La cavitación es normalmente considerada como una fuerza destructiva que necesita ser eliminada en la mayoría de los procesos industriales por los altos costos que genera. En el presente desarrollo, y de forma opuesta, veremos que la cavitación puede ser aplicada de una manera controlada para calentar fluidos y ser utilizada para la mayoría de procesos convencionales.

El desarrollo del presente trabajo comprende las siguientes etapas :

En el capítulo revisión bibliográfica se desarrollaron los siguientes puntos.

- 1.- Descripción del fenómeno de la cavitación, así como su clasificación general.
- 2.- Descripción de la dinámica de la burbuja es decir como es el proceso de crecimiento de una burbuja en un fluido como el agua.
- 3.- La destrucción de la burbuja genera una liberación de energía en tiempos sumamente cortos y esta destrucción depende de varios factores tales como frecuencia, presión y tamaño de la burbuja.
- 4.- Determinación del tamaño adecuado de la burbuja para obtener el máximo de aprovechamiento.
- 5.- Se mostraran varios trabajos desarrollados por varios científicos para obtener el tamaño de la burbuja ideal así como la frecuencia necesaria para llevar a cabo la cavitación.
- 6.- Posteriormente analizaremos el modelo simulado de comportamiento de una burbuja generado por cavitación.
- 7.- Los anteriores puntos, podemos considerar que son efectos microscópicos, describiremos en un aspecto macroscópico el comportamiento de la cavitación.
- 8.- Asimismo se describen las unidades que se han desarrollado, utilizando el concepto de cavitación y que por razones por mi desconocidas no han sido desarrolladas comercialmente.
- 9.- Y por ultimo se describe en forma general las partes de la unidad en estudio así como su funcionamiento.

En el desarrollo experimental.

En este punto se establece el método de prueba, así como el instrumental y equipo requerido para toma de mediciones.
Se determina así la formas de obtención entre la energía de salida y de entrada para calcular la eficiencia de la unidad.

En el capítulo de resultados se muestran los índices de eficiencias obtenidos, así como las gráficas correspondientes, mostrando sus energías de entrada y de salida de la unidad el cálculo correspondiente de su eficiencia.

Y en el último capítulo se establecen las conclusiones de acuerdo a las mediciones desarrolladas. Encontrándose que esta unidad calienta fluidos (agua) a un rendimiento del 98 % y que tiene varias ventajas para su aprovechamiento.

III).- Antecedentes.

3.1 Definición y tipos de Cavitación.

La cavitación es la formación y actividad de burbujas o cavidades en un líquido. Aquí la palabra formación se refiere en términos generales a la creación de una nueva cavidad o la expansión de una preexistente a un tamaño donde los efectos macroscópicos pueden ser observados. Estas burbujas pueden estar suspendidas en el líquido o pueden ser atrapadas en minúsculas explosiones dentro de la superficie límite del líquido o en partículas sólidas suspendidas en el líquido.

La expansión de diminutas burbujas pueden ser consecuencia de la reducción de la presión ambiental por medios mecánicos o estáticos. Las burbujas llegan a ser grandes, lo suficiente para ser visibles a simple vista. Las burbujas pueden contener gas o vapor o una mezcla de ambos. Si las burbujas contienen gas, entonces la expansión puede ser por difusión de gases disueltos del líquido hacia las burbujas, o por reducción de presión o por aumento de temperatura.

Si las burbujas contienen principalmente vapor, la reducción de la presión ambiental de manera suficiente a temperatura constante causa una vaporización explosiva dentro de las cavidades lo cual es lo que se denomina cavitación, mientras la temperatura va aumentando lo suficiente causa que las principales burbujas de vapor crezcan continuamente produciendo el efecto conocido como ebullición esto significa que la vaporización explosiva o ebullición no ocurrirá hasta que un límite sea alcanzado. (figura 1)



Figura 1.- Burbuja con un diámetro de 1mm en la etapa de crecimiento.

Por lo anterior existen cuatro formas para inducir el crecimiento de burbujas:

- 1.- Para una burbuja llena de gas, por reducción de presión o incremento de temperatura, esto es llamada cavitación gaseosa.
- 2.- Para una burbuja llena de vapor, por reducción de presión, esto se denomina cavitación vaporosa.

3.- Para una burbuja llena de gas por difusión. Esto se denomina desgasificación como un gas que se difunde en un líquido.

4.- Para una burbuja llena de vapor, por suficiente elevación de temperatura, esto es llamado ebullición.

La situación es compleja porque la burbuja usualmente contiene una mezcla de gas y vapor. Buscando en otra línea, podemos distinguir entre varios tipos de cavitación de acuerdo a como es producida.

1.- Cavitación hidrodinámica la cual es producida por variaciones de presión en un fluido debido a la geometría del sistema.

2.- Cavitación Acústica la cual es producida por ondas de sonido en un líquido debido a variaciones de presión.

3.- Cavitación Óptica es producida por fotones de alta intensidad (Láser), luz capturada en un líquido.

4.- Cavitación de partícula es producida por cualquier tipo de partículas elementales por ejemplo, un protón, rompiendo un líquido en una burbuja.

Considerando que las cavitaciones hidrodinámica y acústica son producidas por la tensión en un líquido, la cavitación óptica y de partícula son desarrolladas por una aplicación localizada de energía¹. Ver figura 2.

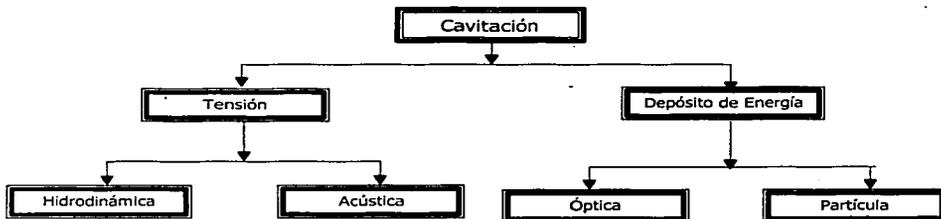


Figura 2.- Clasificación de los diferentes tipos de cavitación¹.

Estos impactos son además periódicos, es decir, se produce un fenómeno vibratorio que aumenta la erosión del material. A estas vibraciones hay que referir la explicación del fallo de algunas piezas por ejemplo, de los pernos de sujeción de los cojinetes de los generadores de las centrales hidroeléctricas cuando se esta produciendo la cavitación.

3.2 Cavitación Hidrodinámica.

En un sistema de fluidos, la velocidad del líquido varía localmente y en el punto de mayor velocidad, se desarrollan bajas presiones y las burbujas o cavidades se inician.

La cavitación incipiente es el término usado para describir el tipo y estado de cavitación que es solamente detectable con la aparición de la cavitación.

La cavitación terminal es el nombre usado para describir la cavitación momento antes de desaparecer.

Las condiciones que indican el límite o margen entre la cavitación detectable y la no producción de cavitación no son siempre idénticas, por ejemplo la presión de desaparición de cavitación ha sido generalmente encontrada ser grande y menos variable, que la presión de aparición de cavitación.

Tres son los casos de elevación de flujo de cavitación.

- Cavitación viajera ocurre cuando cavidades o burbujas formadas en el líquido, viajan con el líquido, se expanden y subsecuentemente colapsan.
- Cavitación fija ocurre cuando una cavidad o bolsa adherida a una capa rígida de un cuerpo inmerso o una forma de paso de fluido, y permanece fija en posición en un estado inalterable.
- Cavitación vorticial ocurre en el fondo de un vórtice formada en regiones de alto esfuerzo cortante y generalmente ocurre sobre las hélices de las propelas de un barco, se le conoce como cavitación de punta.

3.3 Generación de ondas de choque:

Tomando en consideración los trabajos desarrollados por H.G Flynn² podemos considerar las condiciones bajo las cuales las burbujas de cavitación actúan como una fuente de propagación de sonido dentro del líquido como el manejo de frecuencia y amplitud son incrementales.

1.- Para cambios muy lentos en el tamaño de la burbuja, las interrupciones pueden ser relacionados como una propagación instantánea. Esta es una condición estable y el modelo apropiado para el líquido sería uno incompresible. La cavidad debe entonces ser relacionada como no radiante, el trabajo se hará sobre el líquido. Toda la energía transferida al líquido durante la fase de expansión de la oscilación de la burbuja regresa a la burbuja como una forma de contracción. Esto es equivalente a decir que la resistencia a la radiación es despreciable cuando la frecuencia es muy baja².

2.- Para cambios rápidos en el tamaño de burbuja, eventualmente se volverá significativo para decir que la presión desarrollada en el líquido en cualquier punto dependerá sobre el movimiento de la burbuja en un tiempo corto, por ejemplo, existe un retraso de tiempo entre la presión en el líquido y el movimiento de la pared de la burbuja. Este retraso implica una disipación de energía, esta energía comienza a propagarse dentro del líquido circundante, el

cual podrá ser considerado para presentar una radiación finita hacia la burbuja².

3.- Sin embargo se sabe, que la velocidad del sonido en el líquido es una función de la presión. En eventos transitorios, la presión del líquido alrededor de una burbuja, tal como implosión y rebote, puede incrementar al punto donde la velocidad de sonido este seriamente afectada. Interrupciones tenderían a alcanzar aquellas que comenzaron inicialmente. Las ondas comenzarían a llenar a otro y esta es exactamente la condición requerida para que una onda de choque sea desarrollada. El modelo apropiado para usar sería una, parecida a la aproximación de Gilmore³, donde la velocidad del sonido esta en función del movimiento².

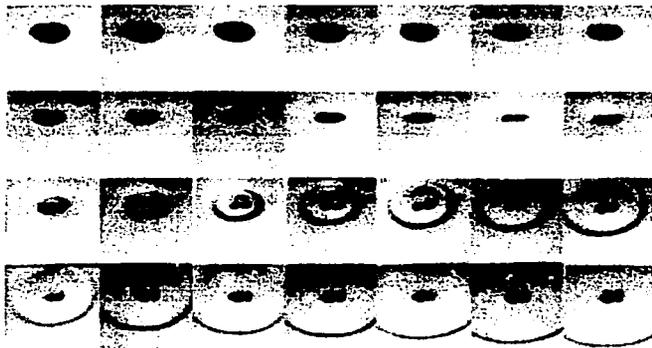


Figura 3.- Ondas de choque generadas por estallamiento de burbujas en un proceso de cavitación.

La fuerza de los choques debidos a la cavitación y su rango de acción han sido estudiados por Schneider⁴, Brand⁵, Benjamin⁶, Akulichev⁷ y sus colegas encontraron ondas de presión radiales que obedecen a la Ley de atenuación geométrica (amplitud $\propto 1/r$). Sin embargo Akulichev⁷, basándose en sus cálculos sobre la aproximación de Gilmore, encontraron una disminución que es tan rápida como la máxima presión moviéndose lejos de la pared de la cavidad. Ellos también muestran que si una onda de choque se forma en el fluido, desarrollará dentro de un radio $r = 20R_0$ de la cavidad. En cualquier caso como Hickling y Plesset⁸ también muestran que la onda de choque permanecerá fuerte dentro de unas pocas distancias radiales desde la burbuja. Por lo tanto los efectos de la cavitación dependen de que las presiones de choque puedan tener lugar solamente en la proximidad inmediata de la destrucción de la burbuja. Esto ha sido confirmado experimentalmente. (ver figura 3)

Benjamín⁶ uso un simple modelo para estudiar la repercusión de donde la onda de choque se formaría. El encontró un criterio en términos de la máxima presión del gas desarrollada en el contracción de la burbuja. Con Pmax in Kilobars el encontró la siguiente formula para una distancia r en la cual la onda de choque se formaría.

$$P_{max} = 13.6(\log \frac{r}{R_{min}})^{-2.73}$$

Sobre esta base, cuando Pmax es mucho menor a 2000 atm, las ondas de choque pueden formarse solo en partes remotas del campo y será muy débil. Sin embargo, con Pmax entre 2000 y 3000 atm probablemente la onda de choque se formará a una razonable distancia. Los mas recientes y exactos cálculos de Hicling y Pleset⁸ muestran que la relación t/Rmin estará en 5-6 cuando Pmax sea mayor a 1000 atm.

En toda esta teoría se asume que la implosión de la burbuja permanecerá esférica. Evidencia fotográfica, muestra que en la superficie esférica puede esperarse una deformación y la implosión es usual y suficientemente violenta para fragmentar la burbuja (ver figura 3)

3.4 La solución de Fujikawa y Akamatsu⁹.

La mas reciente solución de Fujikawa y Akamatsu⁹ toma en cuenta los efectos de compresibilidad del líquido, condensación del vapor en no equilibrio, conducción del calor dentro de la burbuja y en el líquido circundante y la discontinuidad en temperatura en la entrecara de la fase. La figura 4 muestra el perfil de temperatura a dentro y fuera de la burbuja

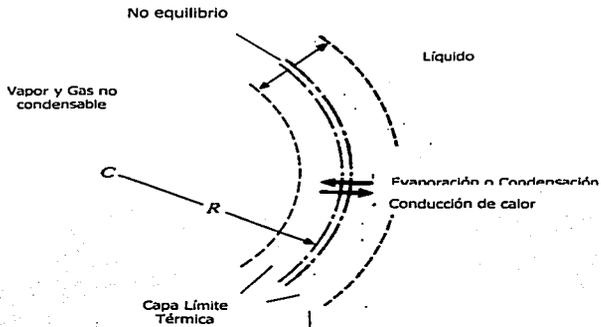
Para una burbuja completamente llena de vapor , ellos calculan el espesor de la capa de la frontera líquida, la cual sería cerca de un décimo del radio mínimo de la burbuja. Para burbujas llenas de vapor o gas la capa limite del liquido es del orden de unas décimas del radio mínimo de la burbuja.

Ellos formulan el problema considerando una burbuja esférica conteniendo ambos vapor o gas en un líquido viscoso compresible. En un tiempo t = 0 consideran que la presión ambiente sería alcanzada instantáneamente en algún valor P_∞; subsecuentemente la burbuja comienza a colapsar y esto es acompañado de un cambio de fase (condensación) y una conducción de calor. a través de la pared de la burbuja. Antes de escribir sus ecuaciones básicas establecieron las siguientes suposiciones.

- 1.- La burbuja siempre permanece esférica.
- 2.- La compresibilidad y viscosidad del líquido no afecta uno al otro.
- 3.- La difusión y gravedad se consideran despreciables.
- 4.- La presión es uniforme en todas las partes internas de la burbuja.
- 5.- El vapor y gas dentro de la burbuja no son viscosos y obedecen a la ley de los gases perfectos.
- 6.- La temperatura de este vapor y gas son iguales.
- 7.- Las capas limite térmicas dentro y fuera de la burbuja son delgadas comparadas con el radio de la burbuja.
- 8.- Existe una delgada pero finita región de no equilibrio en la intercara de fase debido al cambio continuo de fase existente.
- 9.- Las propiedades físicas del líquido y gases son constantes.

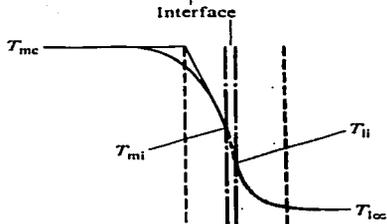
Sobre la base de estas suposiciones los autores derivan tres conjuntos de ecuaciones para; (a) la región externa ocupada por el líquido, (b) la parte interna de la burbuja ocupada por la mezcla de vapor y gas y (c) la intercara de fase.

La solución de estas ecuaciones es adecuada así como el procedimiento es largo y detalles pueden ser encontrados en su documento original.



(a)

Diagrama descriptivo del modelo de una burbuja.



(b)

Diagrama del perfil de la temperatura dentro y fuera de la burbuja

T_{mc} = Temperatura en el centro de la burbuja.
 $T_{l\infty}$ = Temperatura del líquido en el infinito.
 T_{mi} = Temperatura en la pared de la burbuja.

Figura 4

TESIS CON
 FALLA DE CALIFICACION

Los principales resultados pueden ser resumidos como siguen. Se encontró que una onda de presión fue radiada dentro del líquido en el instante de rebote de la destrucción de la burbuja. El resultado muestra que semejante a una onda de presión también podría ocurrir en la repercusión de una burbuja que contiene vapor solamente. También fue posible obtener un historial del radio de la burbuja, la velocidad de la pared de la burbuja, la temperatura de la burbuja así como el líquido circundante, y la presión de vapor y presión de gas dentro de la burbuja. La distribución radial de presión en el líquido fuera de la burbuja fueron varias veces calculadas. (figura 5)

Cronología de la temperatura de una burbuja con un radio de 1.0 mm lleno de aire en agua. La línea llena es la temperatura T_{mc} en el centro de la burbuja. La línea punteada es la temperatura T_{mi} en la pared de la burbuja y la línea encadenada con un punto es la temperatura para una burbuja conteniendo aire experimentando un proceso adiabático y el vapor saturado. $T_{1\infty}$ es la temperatura del líquido en el infinito, $P_{1\infty}$ es el valor de la presión ambiental se incrementa instantáneamente, P_1 es la densidad del líquido, R_0 es el radio inicial de la burbuja (Fujikawa y Akamatsu⁹). En este caso la temperatura máxima en el centro y en la interfase, T_{mi} de la burbuja son 6700 y 3413K respectivamente. Estas temperaturas son mucho mas bajas que cuando colapsan adiabáticamente (8786K). La temperatura de la pared de la burbuja T_{mi} en el desarrollo de burbujas a 292.4 K en un tiempo de 2 μ s después del primer rebote, es debido al rápido crecimiento de la burbuja. La temperatura en el centro de la burbuja, por otro lado, disminuye adiabáticamente durante 11.4 μ s después del rebote y entonces se mantiene cerca de 870K.

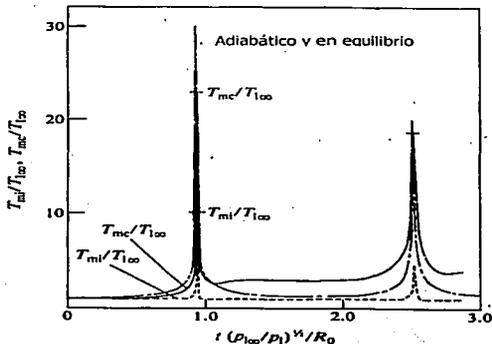


Figura 5 muestra la cronología del contenido de la burbuja para un radio de 1.00 mm llena de aire en agua.

3.5 Ebullición: Burbujas o cavidades unidas a la pared de recipientes.

Gas o vapor es a menudo atrapado en hendiduras en una pared. Una reducción en presión causará que el gas o vapor se expanda, así eventualmente la proyección de las hendiduras dentro de una sistema de fluidos y una pequeña burbuja es llevada a ser el núcleo de la cavitación, como se muestra en la figura 6. El tamaño de la burbuja originada a partir de la salida de gas de una solución en una hendidura en la pared determinada por la magnitud de las fuerzas hidrodinámica actuando sobre la burbuja cuando se proyecte dentro del flujo. Estas fuerzas son opuestas por la fuerza de tensión superficial paralela a la superficie. La fuerza de tensión superficial levanta desde diferentes ángulos de contacto arriba y debajo de la burbuja. Cuando las fuerzas hidrodinámicas, y el gradiente de presión, excede la fuerza de tensión superficial, parte de la burbuja se separa e ingresa al fluido.

Winterton¹⁰ ha derivado expresiones para el radio de una burbuja en un instante de desprendimiento. Baum ha relacionado este tamaño de burbuja a $(P^* - P_v)$, donde P^* es la presión de inicio de cavitación y P_v es la presión de vapor $(P^* - P_v)$, varía con la velocidad de flujo, y Baum ha mostrado que, dado un sistema, el efecto de velocidad puede ser simplemente explicado por variaciones en tamaño de burbuja.

Otro ejemplo de burbujas sobre la pared se encuentra en la ebullición. En un intento satisfactorio de mejorar sustancialmente el entendimiento de la ebullición. Cooper¹¹ ha descrito un programa de trabajo involucrando un amplio estudio experimental de burbujas individuales creciendo en una pared. La figura 7 muestra el plan con el objetivo de empezar con la situación mas simple posible del líquido inicialmente estancado e isotérmicamente supersaturado en gravedad cero. Las siguientes complicaciones son entonces sucesivamente restablecidas: Gravedad fraccionaria positiva o negativa normal a la pared, se sabe que la capa limite térmica inicial introducida con el líquido, el líquido inicialmente en conocido movimiento paralelo a la pared, mezclas binarias y finalmente pares de burbujas. En una actual situación de ebullición, muchos de estas complicaciones estarán presentes simultáneamente.

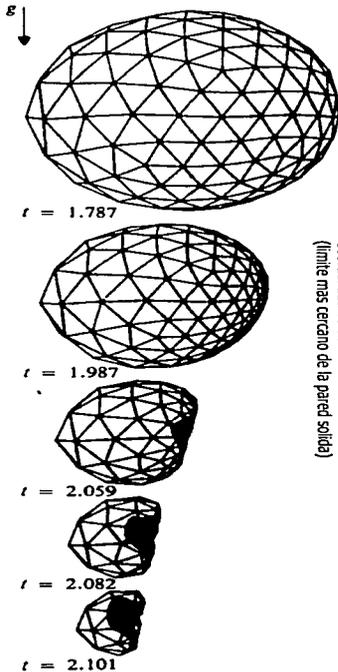
El estudio de Cooper¹¹ incluye burbujas de diámetro de 1mm a pocos centímetros para tiempos arriba de 250 ms. Las capas limite térmicas eran normalmente de unas pocos cientos de micrómetros en espesor, pero pueden ser producidas arriba de 4 mm de espesor. El flujo de la corriente principal fue laminar con una velocidad arriba de 0.2 m/s. Un rango de líquidos orgánicos y agua fueron usados. Las técnicas experimentales incluidas aquella que producen un bajo ambiente de gravedad para un descenso libre, activando burbujas por un punto eléctrico caliente o por una activación electrolítica de burbujas, creando un movimiento relativo entre el líquido y la pared, se registra temperatura y presión a alta velocidad por un grabador ultravioleta o por un microprocesador controlado digitalmente para la adquisición de datos y una cámara de cine de alta velocidad. Los resultados confirman que el lento crecimiento de las burbujas tienden a ser esférico y un crecimiento rápido de la burbuja tiende a ser hemisférico.

Con un capa limite térmica , las burbujas salen en gravedad cero , los cuales no hacen nada en un líquido isotérmico. Con el líquido en movimiento se incrementaron los problemas de burbujas no deseadas, como en cavitación. Sin embargo, se encontró que el fluido líquido aumentó la tasa de crecimiento de las burbujas debido a que los efectos conectivos incrementan la transferencia de calor.

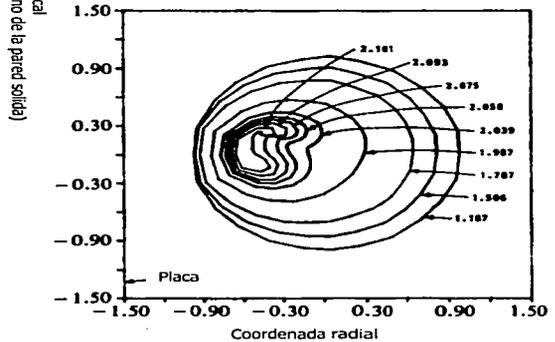
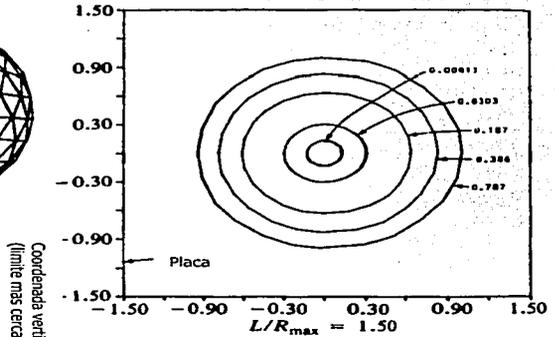
Los resultados indican una fuerte interacción entre la inercia a partir del crecimiento ($V_0 p R^2$) y a partir del flujo de la corriente principal, con un pequeño efecto de la tensión superficial.

En principio los resultados podrían ser obtenidos por cálculos, pero no es fácil, dado que ellos involucraron un problema unido de energía y mecánica de fluidos con cambio de fase en un movimiento de interfase desconocido el cual muestra efectos significativos de viscosidad y tensión superficial.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



(a) Formas superficiales



(b) Perfil de la burbuja

Figura 6.- Desarrollo y crecimiento de una burbuja de cavitación.

Objetivo : Entender el mecanismo de ebullición

Aproximación : Estudio de burbujas durante su crecimiento y cambio de forma

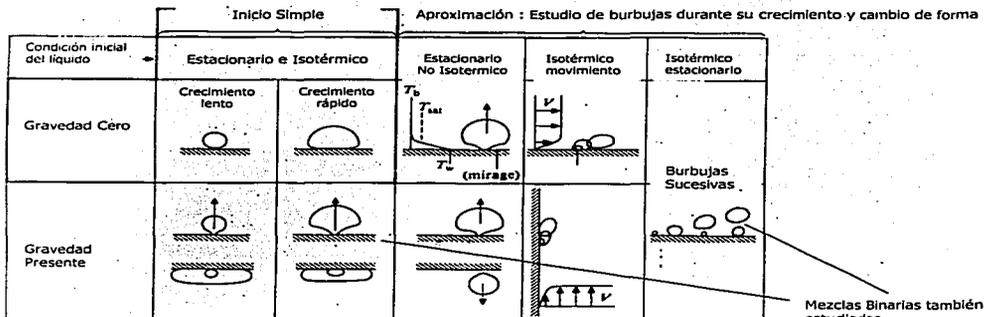


Figura 7.- Resumen de estudio de mecanismo de nucleación de ebullición

Aun así sobre el tema de ebullición es instructivo considerar la pregunta porque una olla se vuelve silenciosa cuando viene la ebullición pero es ruidoso sobre el punto de ebullición. Como cuando una olla se calienta, la base se encuentra naturalmente mas caliente que el agua que se encuentra arriba de ella. Después de un minuto rompe sobre el lado interno de la superficie de la base, burbujas de vapor emergen de sus burbujas padres las cuales están siempre presentes. Cuando la burbuja rompe entra agua fría la cual condensa el vapor, haciendo que la burbuja se rompa de manera catastrófica generando una pequeña onda de choque. Millones de burbujas colapsando pueden hacer mucho ruido como silbido. Como el agua se calienta, las burbujas pueden crecer tan grandes y pueden coalescer antes de colapsarse, y el colapso será menos violento, así que el ruido disminuirá. Finalmente, las burbujas alcanzan la superficie y el ruido del colapso desaparece, el cual hace la ebullición sumamente silencioso.

3.6 Burbujas de Cavitación en proceso incipiente sumergido en agua.

El comportamiento de la cavitación de burbujas en un proceso incipiente cuando se encuentra en una boquilla circular sumergido en agua es estudiada por una técnica simple fotográfica en un intervalo corto de velocidades de expulsión de salida. Un número pequeño de burbujas esféricas son inicialmente generadas en vértices incipientes en un la punta de la boquilla y frecuentemente conectadas circunferencialmente con otra en forma similar a la de un anillo. Por el análisis fotográfico se registraron datos de las vistas laterales y finales a partir de las fotografías de las burbujas en forma de anillo, sus propiedades promedio, como su trayectoria, geometría y tamaño son evaluadas.

Es bien conocido que la cavitación incipiente ocurre cuando núcleos de burbujas son expuestas a presión suficientemente baja, comparable con la presión de vapor del líquido, para causar su inestable y explosivo crecimiento (Arndt¹⁶ 1981 Brenen¹⁷ 1995)

En boquillas sumergidas en agua donde la principal presión estática es generalmente más alta que la presión de vapor, la generación de cavitación se cree que toma lugar en regiones de baja presión producidas por estructuras en forma de vórtices. Observaciones hechas por Ooi¹⁸ (1995) y Gopalan¹⁹ (1999) muestran que la cavitación incipiente inicialmente en un flujo laminar no ocurre en el centro del vórtice que se encuentra girando pero si en los centros de los vórtices secundarios los cuales son formados aleatoriamente. Esto sugiere que las investigaciones del proceso de generación de burbujas son bastante difíciles en regiones con flujos turbulentos.

Una de las aproximaciones para evitar la dificultad sería parte tratar con cavitación un flujo de chorro, donde los vórtices están mejor organizados y son formados periódicamente o reproduciblemente, los cuales son un chorro auto-excitado. (Chahine²⁰ & Genoux²⁰ 1983). En el trabajo desarrollado por K. Nakano y M. Hayakawa, se empleó un chorro impulsivo donde se generan vórtices del chorro produciendo presiones asimétricas bajas. Esta baja presión puede producir la formación de burbujas de cavitación parecidos a anillos en una región cercana del orificio. Pudieron estudiar el comportamiento de las burbujas en forma de cavidades.

Condiciones experimentales y desarrollo experimental.

El aparato experimental consiste en un depósito cerrado lleno de agua conectado a un compresor de aire, el depósito de agua es abierto a la atmósfera y un tubo circular de 15 mm de diámetro conecta a dos depósitos, como se muestra en la figura 8. El flujo de agua es operado por una válvula electromagnética y descarga hacia un orificio tipo boquilla con un diámetro de salida de 5 mm. Un transductor de presión piezoeléctrico con una frecuencia de resonancia de cerca de 300 KHz esta montado en un tubo a 65 mm arriba de la salida de la boquilla.

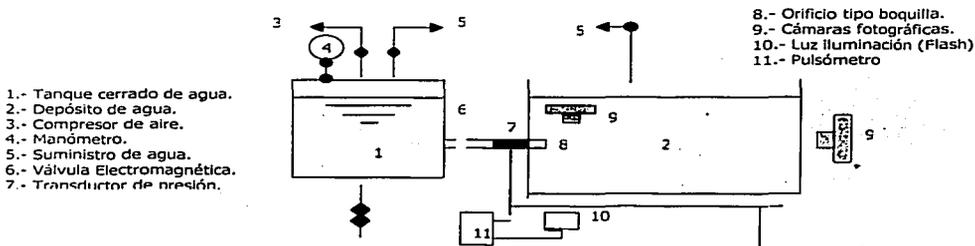


Figura 8.- Unidad experimental para desarrollo de burbujas de cavitación.

La señal de salida del transductor es usada para medir el cambio de presión transitorio del agua en el tubo. Así como detectar el salto del flujo y el disparo de una fuente de luz para la fotografía. La fuente de luz es una luz de flash con una duración de iluminación de 0.0002 ms el

cual es suficientemente corto para burbujas de cavitación individuales para ser capturadas como imágenes en fotografías bajo condiciones de prueba. Observaciones de flujo son efectuadas por dos cámaras, una es localizada arriba de la salida de la boquilla y la otra es colocada fuera en el depósito abierto tomando la vista frontal de la sección de salida de la boquilla.

Experimentos fueron desarrollados por un calibrador de presión de nivel, P_g , del depósito cerrado de agua en un rango de 0.3 a 0.5 Mpa y una velocidad media a través de la sección U_j , en la salida de la boquilla en el rango 15.3 a 19.5 m/s. El correspondiente número de Reynolds basado en U_j un orificio con Diámetro $D(5\text{mm})$ son 7.5×10^5 . El Agua fue usada sin ningún tratamiento para el proceso de desgasificación, así que el aire disuelto contenido estaría en una condición de saturado. La temperatura del agua se mantuvo en 23°C a través de los experimentos.

La figura 9 muestra un ejemplo del transductor de presión, donde P^* indica la diferencia en la presión de agua a través de la boquilla y el tiempo transcurrido. El mecanismo utilizado es una válvula electromagnética activada con corriente eléctrica, y una válvula (llamada válvula piloto) la cual abre primero y descarga una cantidad pequeña de agua y en consecuencia una válvula principal inicia su apertura. Debido a este mecanismo P^* muestra primero una bomba y entonces se leva seguida por un gradual incremento al máximo. Porque la protuberancia fue encontrada para mostrar reproducibilidad antes del, una concentración inicio del flujo principal, se usó como señal de disparador del flash la luz y también como origen de los resultados encontrados.

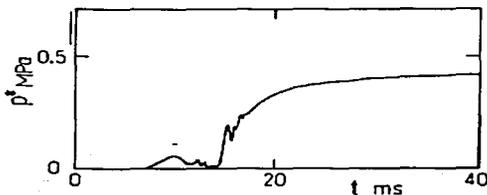


Figura 9. Un ejemplo de señal de transductor de presión: $P_g = 0.5$ MPa

3.6.1 Resultados.

Se visualizaron primero vórtices incipientes usando marcadores de agua. Un instante después el flujo fue iniciado una concentración de tinta en forma de hongo fue observada en el extremo del flujo. Estas concentraciones están asociadas con vórtices incipientes, esto es el principal y es debido a la apertura de la válvula piloto y la segunda cuando la válvula principal es abierta.

Observaciones similares, repetidamente hechas para reducir la cantidad de tinta, muestran que las burbujas esféricas aparecen en su mayor parte en la región principal y el segundo en las regiones concentradas de tinta y tienden a alinearse en una dirección azimutal para tomar una forma de anillo. Esto sugiere que la cavitación incipiente ocurre dentro de los comienzos de los vórtices. En pasos posteriores de desarrollo de flujo, se encontró que pequeñas burbujas se encontró su formación atrás de los vórtices incipientes, algunos en grupos y otros se encontraban solos distribuidos aleatoriamente en capas de flujo del chorro. Se obtuvieron los siguientes resultados un $P_g = 0.5$ MPa será presentado, enfocando principalmente en el comportamiento de las burbujas en forma de anillos

Algunas vistas laterales en diferentes estados del desarrollo de un flujo se muestran en la figuras 10 a-d. Se ha confirmado que a partir de fotografías con mucho acercamiento, la mayoría de las burbujas en forma de anillo consiste de un número pequeño de burbujas esféricas y las formas de las protuberancias expuestas parecen a las cadenas de los rosarios los cuales forman anillos uniformes en forma azimutal. Las protuberancias en forma de anillo apartadas de las burbujas también fueron frecuentemente observadas. Las burbujas en (ver figura 9c) en la punta del chorro de agua fueron muy pequeñas y generalmente aisladas debido a la circulación débil del vórtice principal causado por la válvula piloto abierta. Para una descripción adecuada, la formas de burbujas parecida a anillo incluyendo las separadas serán referidas como anillo de burbuja.

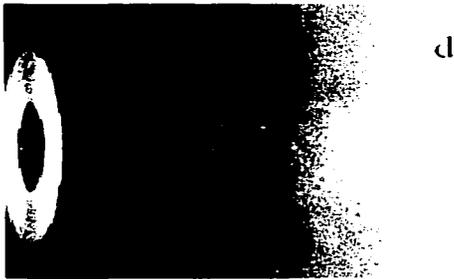
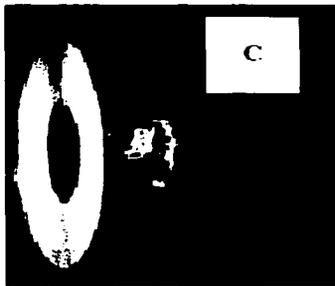
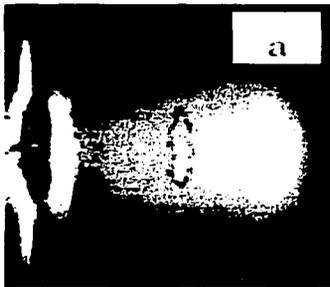


Figura 10.- Cuatro ejemplos mostrando anillos de burbujas. El flujo es de izquierda a derecha.

La figura 11 muestra la posición del flujo de la corriente de los anillos de burbujas en función del tiempo, donde los anillos principales y secundarios de burbujas son mostrados por medio de triángulos y círculos respectivamente: Los anillos de burbujas principales que se mueven a diferentes velocidades, los flujos iniciales son lentos, de aproximadamente de 4m/s y después llega a 10 m/s en un $x/D < 8$ Cuando dos anillos de burbujas son sucesivamente formadas, el segundo anillo de burbujas captura e interactúa con el anillo principal en un valor de alrededor $x/D = 8$ (ver fig 10 d)

Observaciones de fotografías frontales muestran que los anillos de burbujas raramente mantienen una forma asimétrica cuando se encuentra el flujo activado, y generalmente se somete a un tipo de deformación ondulada, probablemente reflejando la presencia de una inestabilidad azimutal del anillo vorticial (Widrall & Sullivan). El anillo de burbujas encontrado persiste en un flujo arriba de $x/D = 15-20$ pero no queda claro cual será la magnitud a la cual sobrevivirá debido al incremento de la distorsión y difusión de los anillos de burbujas mas allá de la corriente

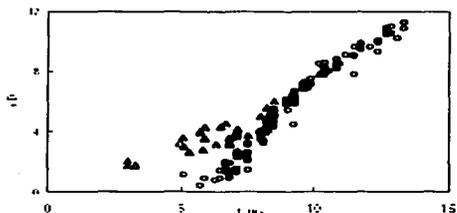


Figura 11.- Posición del anillo de burbujas como en función del tiempo.

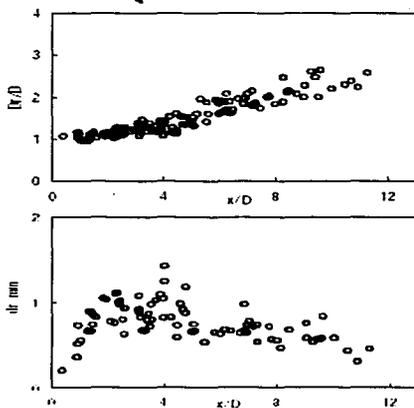


Figura 12.- Diámetro y espesor de anillos de burbujas (a) diámetro (b) espesor.

Las figuras 12(a y b) muestran variación en el caudal de una diámetro promedio D , y espesor d , de anillos de burbujas, las cuales fueron evaluadas por medio de fotografías laterales y frontales. El diámetro D_r , el cual inicialmente cierra el diámetro del orificio incrementa con un max de acuerdo con el crecimiento del anillo del vórtice. El espesor del anillo del a burbuja aparece para alcanzar su máximo en $x/d = 3-4$, seguido por una disminución gradual cuando incrementa x . A partir de D y d se evaluó el volumen aproximado V_r del anillo de burbuja, asumiendo la geometría para ser un parecido correlación. El resultado se muestra se muestra en la figura 13 , donde V_r es representada en una escala logarítmica. El volumen exhibe un rápido incremento cercano a 1 valor de $x/D = 3$, mas allá de lo cual no existe incremento en contraste con un continuo incremento del diámetro del anillo de la burbuja.

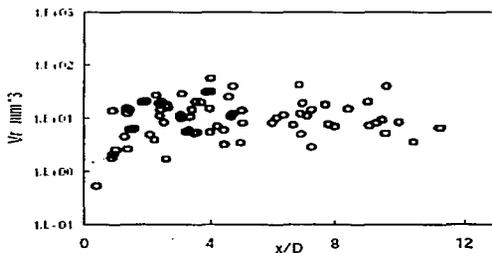


Figura 13.

La figura 14 muestra el diámetro promedio d_i , de burbujas individuales formando un anillo de burbujas. El tamaño típico de las burbujas contenidas en un anillo de burbujas exhibe un incremento abrupto después de su formación, seguido de una disminución gradual.

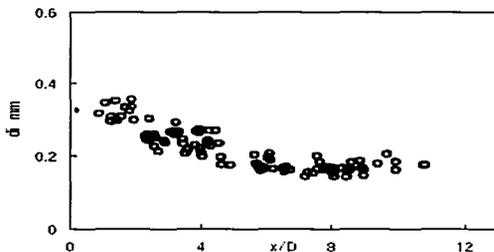


figura 14

Estos resultados indican que fuera de la región de formación, la evolución de anillos de burbujas no es afectada por el aire disuelto en el agua circundante del flujo. En particular, valores constantes aproximados de V_r y d_i en $X/D > 5$ sugiere que un contenido de aire es desalojado y ocurre mas allá del potencial central de la corriente durante la evolución de anillos de burbuja.

3.6.2.- Resultados del experimento.

Burbujas de cavitación en una corriente incipiente fueron estudiadas en rangos moderadamente bajo de velocidad de salida. La naturaleza reproducible de la corriente nos ayuda a observar el comportamiento por medio de una simple técnica de fotografía. Los principales resultados están resumidos como a continuación se describen :

- 1.- En etapas iniciales del desarrollo de la corriente, las burbujas de cavitación principalmente dentro de los vórtices incipientes y conectados con cada otra forma de anillo.
- 2.- Una vez formada los anillos de burbujas viajan corriente a bajo con vórtices incipientes y generalmente sobreviven por arriba de 20 veces el diámetro de la boquilla.
- 3.- El promedio del tamaño de las burbujas individuales formadas, los anillos de burbujas rápidamente se incrementa en la vecindad de la boquilla y entonces gradualmente disminuye cuando viajan corriente abajo.
- 4.- En pasos posteriores del desarrollo del fluido, las burbujas aisladas se forman atrás de los vórtices incipientes, algunos están en grupos y otros están aleatoriamente distribuidas en la capa desarrollando esfuerzos cortantes en el fluido.

3.7 Cavitación en fluidos. (Efecto Macroscópico)

3.7.1 Fenómeno de cavitación

Cuando se trata de flujos de alta velocidad es posible que se provoquen problemas de cavitación. La cavitación se crea por las bajas presiones locales cercanas a la presión de vapor a la temperatura reinante en el mismo. Creadas en la capa límite debido a la relación entre la presión local (cerca de la superficie) y la energía de velocidad del flujo. Así un flujo puede crear problemas de cavitación para altas velocidades y bajos niveles de agua y anularse este fenómeno aumentando el nivel de agua o bien disminuyendo su velocidad.

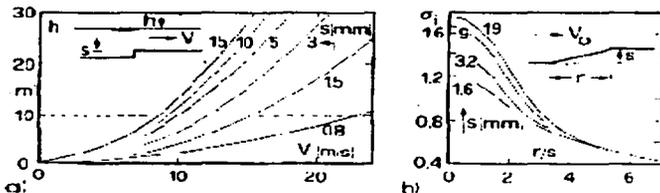
Cuando ninguna de estos dos últimos casos pueden realizarse se siguen presentando problemas de cavitación; entonces se recomienda airear el flujo para aumentar la presión local. El índice de cavitación es representativo del estado del flujo en cuanto a posibilidad de que este cavite. Este número se expresa como la relación entre presión absoluta local respecto a la presión de vapor y la energía de velocidad del flujo. El índice de cavitación se puede entonces escribir como:

En donde h es la presión atmosférica en metros de columna de agua para la localidad en cuestión, h_v la altura de agua del flujo y h_v la presión de vapor en metros de agua, $V_o/2/2g$ es la altura de energía de velocidad del flujo.

El modelo físico a escala reducida es incapaz de advertir por sí sólo el problema de cavitación, pues este fenómeno se da a partir de velocidades de flujo elevadas, del orden 10 m/s o más, mientras que las velocidades en el modelo no exceden los 2 m/s. Así que el estudio de la cavitación se realizó de manera semi-teórica. A partir de los resultados obtenidos en modelo reducido, se es capaz mediante la escala de Froude de traducir las magnitudes medidas a escala de prototipo. Con estos valores se pueden evaluar parámetros que permitan identificar los problemas de eventual cavitación.

En la Tabla adjunta se calcula el índice de cavitación para los valores de presión de vapor y de presión atmosférica expuestos a continuación. La presión atmosférica media en Monterrey, que está a una altitud de 405 m sobre el nivel del mar es de 9.75 m.c.a (metros de columna de agua) y la presión de vapor para agua a 10°C es del orden de 0.119 metros de columna de agua. Con estos valores y los resultados obtenidos en modelo reducido es posible determinar el índice de cavitación a lo largo de la trompeta y el túnel y como se aprecia en la tabla y las figura 15 a y 15b (En la primera a partir de las velocidades medidas y la segunda a partir de las velocidades medias calculadas con la ecuación de continuidad).

Figura 15 a y 15 b .
Cavitación incipiente en a) rebabas abruptas y b) índice de cavitación para cambios de dirección en la alineación de la superficie.



El índice de cavitación en el arranque del túnel es del orden de 5 y disminuye rápidamente para llegar a tener un máximo en el entronque entre túnel y trompeta. Allí donde el valor es mínimo y se pueden presentar problemas de cavitación. El valor más pequeño del índice es de 1.75. Este valor representa que habrá muchas posibilidades de cavitación incipiente en la zona del entronque. La cavitación incipiente puede ser problemática si existen cambios bruscos de dirección del flujo debido a rebabas de tamaño importante en los contornos. En el gráfico de la Figura 15 tomado de [3] se observa que la rebaba debe ser menor que 20mm, cosa que debe tenerse en cuenta para la construcción de las diferentes superficies de la trompeta y del túnel en las inmediaciones del entronque.

La cavitación, es un fenómeno que se produce siempre que la presión en algún punto o zona de la corriente de un líquido descendiendo por debajo de un cierto valor admisible. El fenómeno puede producirse lo mismo en estructuras hidráulicas estáticas (tuberías, venturís, etc) que en maquina hidráulicas) bombas, hélices, turbinas. Por los efectos destructivos que en las estructuras y maquinas hidráulicas mal proyectadas o mal instaladas produce la cavitación es preciso estudiar este fenómeno, para conocer sus causas y controlarlo. En nuestro caso tomaremos este efecto para estimular y generar cavitación que consecuentemente genera calor en el fluido. (figura 15 b) (Crecimiento y destrucción y generación de onda de choque)

Escribamos la ecuación de Bernoulli entre los puntos 1 y 2 de cualquiera de la figura 16. Resulta mas cómodo en el fenómeno que estudiamos considerar presiones absolutas, Por lo tanto.

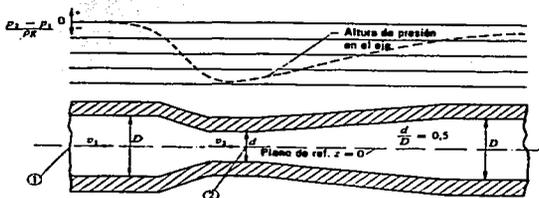
$$P_1/p + v_1^2/2g - Hr_{1-2} = P_2/p + v_2^2/2g + Z_2 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde

P_1, P_2 presiones absolutas en los puntos 1 y 2.

Hr_{1-2} pérdida de altura entre los puntos 1 y 2.

Z_1, Z_2 cotas de los puntos 1 y 2, tomando como plano de referencia el plano horizontal que se indica en la figura.



De la ecuación 1 se deduce en las dos primeras figuras ($P_1 =$ presión barométrica)

$$P_2/pg + P_{amb}/pg - (v_2^2 - v_1^2)/2g - Z_2 - Hr_{1-2}$$

Figura 16.- Desarrollo de cavitación en tubo venturí.

Según la ecuación 2 la presión P_2 es menor que la presión P_{amb} ya que los tres últimos términos en dicha ecuación son negativos (el Z_2 puede ser nulo)

La presión P_2 en la ecuación 2 :

Teóricamente puede bajar solo hasta el 0 absoluto; porque la presión absoluta no puede ser negativa nunca.

Prácticamente existe un límite inferior de la presión mayor que 0 que es la siguiente: P_s donde P_s es la presión de saturación de vapor a la temperatura en el que se encuentra el fluido.

En efecto la termodinámica enseña que un líquido entra en ebullición a una presión determinada, llamada presión de saturación s , que depende de la temperatura, la actual temperatura de saturación, T_s , para dicha presión (véase Anexo I) así, por ejemplo, el agua a $100\text{ }^\circ\text{C}$ entra en ebullición, si la presión es $(P_s)100\text{ }^\circ\text{C}$ es 1.0133 Bar , pero a $25\text{ }^\circ\text{C}$ puede hervir el valor de $P_s\text{ }25^\circ\text{C} = 0.03166\text{ Bar}$. Los valores de P_s en función de la temperatura se encuentran en las tablas de vapor del líquido en cuestión. Ver anexo I (Presión de saturación del vapor de agua para cada temperatura).

El comienzo de la ebullición del líquido es también el comienzo del fenómeno de cavitación que se describe con mas profundidad mas adelante. Por lo tanto de la ecuación 1 se desprende que la presión o respectivamente P_2 o respectivamente P_1 será tanto menor y el peligro de la cavitación tanto mayor:

- Cuando menor sea P_{amb} o sea la presión barométrica del lugar.
- Cuanto mayor sea la altura de la velocidad creada en la zona de depresión. (En la figura 1ª, cuanto el diámetro de la garganta del venturi sea menor, y por lo tanto la velocidad de la garganta U_2 sea mayor).
- Cuanto mas se eleve la bomba o turbina con relación al nivel inferior.

Así, por ejemplo según la tabla del Anexo I, si las condiciones de las instalaciones representadas en la figura 1, son tales que la presión en la sección 2 alcanza un valor absoluta de 0.10 Bar y se bombea agua fría el agua no hervirá y la bomba funcionará normalmente; pero se bombea agua caliente a 50°C el agua entrará en ebullición y se producirá el fenómeno de cavitación. El fluido bombeado es ahora una emulsión de rendimiento de la maquina. Como la presión sigue bajando en el interior de la bomba, o sea agua debajo del punto 2 la bomba entra en cavitación aun para presiones mas altas en la sección 2, como se vera mas adelante al estudiar la formación de burbujas.

3.8 Descripción de la cavitación :

Según se ha dicho anteriormente, cuando la corriente en un punto de una estructura o de una maquina alcanza una presión inferior a la presión de saturación de vapor, el líquido se evapora y se origina en el interior del líquido (cavidades) de vapor de ahí el nombre de cavitación. Estas cavidades o burbujas de vapor arrastradas por las corrientes llegan a las zonas en que reina una presión muy elevada, y allí se produce una condensación violenta del vapor. Esta condensación del vapor a su vez produce una elevación local de la presión que puede sobrepasar el 1.0 Bar . En el interior del flujo existen, pues zonas en que reina un fuerte gradiente de presiones que aceleran las burbujas y producen un impacto en el contorno (Venturi, bomba, turbina).

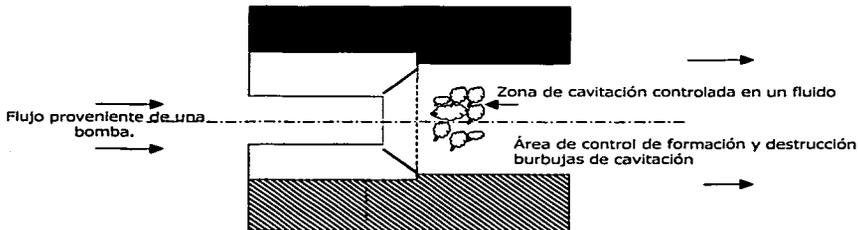
3.8.1 Nucleación y límites de cavitación.

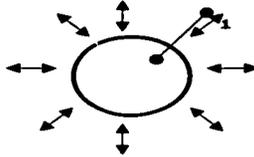
Supongamos que encendemos un campo sonoro dentro de un líquido. Notaremos que nada se observará hasta que la amplitud de la presión del sonido sea incrementada en un mínimo valor. Este mínimo valor es llamado límite de cavitación para circunstancias particulares. El comienzo de la cavitación es de interés fundamental. Si la cavitación se origina a partir de burbujas muy pequeñas de aire existe una dificultad para desarrollar un núcleo, sería esperado que desapareciera

3.9 Control de la Cavitación.

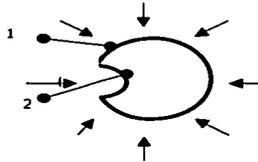
Los diagramas siguientes explican los elementos esenciales de dinámica de burbuja de cavitación para ser producido y controlado. El control del proceso dinámico de una burbuja es la parte mas importante de este desarrollo.

Millones de burbujas de la cavitación se crean en el flujo-a través de la cámara del proceso. Los diagramas siguientes explican las fases básicas de la vida de cada burbuja y las fuerzas primarias creadas por el destrucción de la burbuja. Además de las fuerzas creadas por cada burbuja, estas actúan también entre sí en aplicar el energías adicionales al fluido procesado.

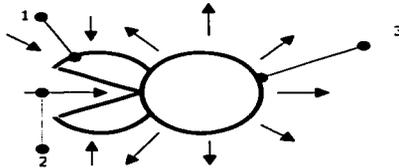




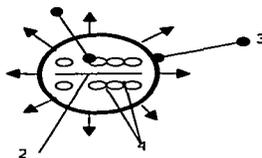
Estado 1.- Cuando la burbuja forma en la zona de presión baja, pulsa. Esta pulsación crea lo que se denomina una Fuerza de Bierkness que atrae las partículas circundantes a la superficie de la burbuja.



Estado 2.- Un aumento en la presión circundante induce el derrumbamiento de la burbuja - normalmente en el forma de un microfluidos en una parte de la burbuja.



Estado 3.- El impacto de microfluidos impacta en la pared de la burbuja adyacente . La velocidad del microfluido puede alcanzar velocidades de 3000 - 4000 ft/sec. o Una onda de choque o de presión se crea desarrollando impulsos pueden alcanzar 150,000 psi



Etapa 4.- Microfluído continúa a través de la pared de la burbuja contraria y penetra profundamente en medio circundantes creando una capa cortante entre el microfluído y el líquido adyacente. El resultado es la turbulencia extrema con las proporciones del esquila a 100,000,000 S-1 o superior y un significativo aumento de la temperatura

El ultrasonido (US) es la parte del espectro del sonido de la frecuencia de aproximadamente 16 KHz que está fuera del oído humano. Los efectos químicos producidos por ultrasonido son derivados de la creación, expansión y destrucción de burbujas pequeñas cuando un líquido se está irradiando por ondas de ultrasonido. Esta cavitación genera altas temperaturas y presiones en los puntos definidos dentro del líquido. El líquido circundante enfría rápidamente esas partes del medio, por eso una "grieta" del tamaño de unas micras desaparece en menos de 1/1000000 de segundo. La temperatura de cavitación varía desde 1000 hasta 10000 K, mas frecuentemente en el rango 4500-5500 K.

Hay que mencionar que la radiación acústica es la energía mecánica (no cuántica) que se transforma en energía térmica. A diferencia de los procesos fotoquímicos, esa energía no se absorbe por las moléculas. Debido al rango extenso de frecuencias de la cavitación, muchas reacciones no son reproducibles.

La influencia de varios factores para el éxito de la aplicación de ultrasonido para la generación de ondas de choque por medio de la cavitación puede ser resumida de la manera siguiente.

- 1.- Frecuencia. El aumento de la frecuencia lleva al descenso de la producción e intensidad de cavitación en los líquidos. Este hecho puede ser explicado así : A altas frecuencias, el tiempo necesario para que una burbuja que aparece como resultado de la cavitación crezca hasta un tamaño suficiente para afectar a la fase líquida es demasiado pequeño.
- 2.- Viscosidad.- La cavitación produce efectos considerablemente menores en los líquidos viscosos o estos con tensiones superficiales mas altas.
- 3.- Temperatura.- El aumento de temperatura permite llevar a cabo la cavitación a intensidades acústicas más bajas. Eso es una consecuencia del aumento de la presión de vapor del solvente con el aumento de la temperatura.
- 4.- Aplicación de gases : Si se aplican gases (poco bien solubles en el solvente), la intensidad de cavitación disminuye debido a la formación de un gran número de núcleos adicionales en el sistema.

5.- Presión externa: El aumento de la presión externa lleva al aumento de la intensidad de destrucción de burbujas de cavitación, o sea los efectos del ultrasonidos en este caso son más rápidos y mas violentos en comparación con la presión normal.

6.- Intensidad: En general, el aumento de la intensidad del ultrasonido fortalece los efectos producidos.

3.10 Eficiencia térmica.

Por eficiencia entendemos generalmente el cociente de un resultado deseado entre la cantidad necesaria para producirlo. Es decir, la eficiencia es una medida de lo que se logra en comparación con su costo. Un concepto importante de eficiencia energética para los dispositivos ciclos de conversión es la eficiencia térmica η_{TH} . Dicha Eficiencia se define como el cociente de la producción neta de trabajo (resultado deseado) entre la alimentación o entrada de calor (costo incurrido) . Por lo tanto :

$$\eta_{TH} = \frac{\text{salida neta de trabajo}}{\text{entrada de calor}}$$

La definición anterior de eficiencia térmica resulta en un valor entre 0 y 1. Generalmente se multiplica la razón expresad en la ecuación por 100, expresando entonces la eficiencia térmica como un porcentaje. Las eficiencias térmicas de los dispositivos modernos convencionales son extremadamente bajas. A continuación se relacionan algunos valores correspondientes a equipo móvil y estacionario. Estos datos reflejan las eficiencias de los dispositivos cíclicos que convierten energía química (principalmente la proveniente de combustibles fósiles) a energía mecánica. En la tabla siguiente se presentan eficiencias aproximadas para otros tipos comunes de convertidores de energía. Dichos convertidores no operan en forma cíclica (repetitiva) y tienen eficiencias notablemente mayores. Modificaciones recientes al diseño de hornos de gas para calefacción casera han logrado elevar la eficiencia de dicho equipo a valores superiores al 90 %. Es importante resaltar también la diferencia significativa de conversión entre lámparas fluorescentes y las incandescentes. La celda de combustible opera de manera similar a una batería, con la excepción de que los reactivos se alimentan de una forma continua a la celda y los productos se descargan continuamente. El desarrollo de la celda de combustible para producción comercial de electricidad es un resultado indirecto de la exploración del espacio.

El concepto de Eficiencia esta muy ligado con la Segunda Ley de la Termodinámica que al contrario de la primera Ley de la Termodinámica, la segunda ley no tiene un enunciado concreto sino varios:

- 1.- Un proceso cíclico debe transferir calor desde un depósito caliente a uno frío, si se va a convertir en trabajo.
- 2.- Se debe hacer trabajo para transferir calor de un depósito frío a uno caliente.
- 3.- Ninguna máquina puede operar con mas rendimiento que una máquina Carnot.
- 4.- No puede existir una máquina con movimiento perpetuo de la segunda clase(una que extraiga calor de los alrededores de T, trabaje sobre él y retorne al estado inicial sin transferir calor a otro sistema de una temperatura más baja que T.
- 5.- La entropía o desorden del universo aumenta.

La mayoría de éstos enunciados pueden reducirse a la aseveración de que todos los procesos reales son irreversibles, por ejemplo, el sistema y su alrededor no pueden ser regresados a sus estados originales.

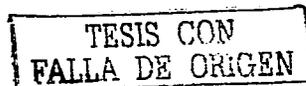
Tipo	Eficiencia	Tipo	Eficiencia
Automóvil Ciclo Otto 4 tiempos	12-25 %	Química a térmica. Calefactor Casero	60-90 %
Camión Ciclo Diesel	30-35 %	Química a eléctrica Acumulador Pila seca Celdas de combustible	70 % 90 % 40-60 %
Turbina de gas (100hp) Sin regeneración Con regeneración	12 % 16%	Eléctrica a radiante Lámpara incandescente Lámpara fluorescente Lámpara de vapor de sodio	7 % 21 % 40 %
Turbina de gas (> 750 kW) Sin regeneración Con regeneración	25 % 34 %	Eléctrica a mecánica Motor eléctrico	90 %
Planta Termoelectrónica	38-41 %	Química a cinética Cohetes Motores a reacción	45 % 40 %
		Potencial a mecánica Turbina hidráulica	95 %
		Radiante a eléctrica Celda Solar	12 %

3.11 Historial del desarrollo de Unidades de calentamiento por medio de agitación y/o cavitación.

1.- La unidad de calentamiento utiliza la cavitación (ondas de choque) para producir calentamiento. Existen varios diseños los cuales utilizan rotores o elementos cilíndricos para incrementar la presión y/o temperatura de fluidos. Estos incluyen unidades que convierten los fluidos de fase líquida a fase gaseosa. El Dr. Schaefer desarrollada en 1974, describe un aparato y método para la producción de vapor y presión por la creación intencional de burbujas de cavitación por ondas de choque en un cuerpo dilatado como el agua. Varios circuitos complejos y cámaras son empleados para crear una trayectoria complicada para el fluido y maximizar el efecto de cavitación por el efecto de calentamiento/presurización.

Otras unidades desarrolladas que emplean elementos rotatorios para calentar fluidos fueron publicadas bajo las siguientes patentes.

Patente US No. 3,720,0372 Desarrollada por Jacobs en marzo de 1973 el cual expone una bomba enfriadora tipo turbina motorizada por medio de una máquina de cuatro tiempos para calentar la máquina refrigerante.



Patente US 2,991,764 publicada en julio 11 de 1961 el cual expone agitador de fluidos tipo calentador.

Patente US No. 1,758,207 desarrollada por Walker en mayo de 1930, el cual expone un sistema de generación de calentamiento hidráulico el cual incluye a un generador formado por un rotor vanguardista y un estator actuando simultáneamente para calentar fluidos cuando existe un movimiento relativo entre ellos

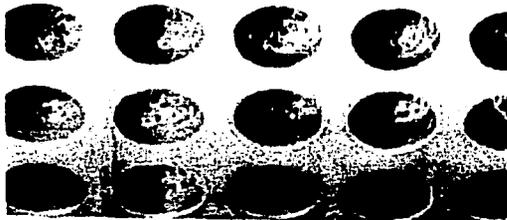
Estas unidades emplean rotores y estatores estructuralmente complejos los cuales incluyen ductos o circuitos para el paso del fluido, de esta manera resulta una unidad estructuralmente compleja, que tiene consecuentemente altos costos de fabricación e incrementa la probabilidad de falla estructural y en consecuencia un alto costo de mantenimiento y reducida confiabilidad.

En consecuencia al presente desarrollo de la unidad para el calentamiento de fluidos en un espacio vacío localizado entre un rotor giratorio y una cubierta estacionaria, hace una unidad estructuralmente reducida y por lo tanto los costos de fabricación y mantenimiento son bajos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.12 Descripción general de la unidad de calentamiento de fluidos:

La unidad desarrollada, trabaja en general abasteciendo un fluido, limpio o contaminado, dentro de la unidad, donde es pesado por un cilindro que gira a una velocidad determinada. La geometría específica de los orificios en el cilindro el espacio entre el cilindro y cubierta y la velocidad rotacional crean una diferencia de presiones dentro del líquido donde burbujas muy pequeñas se forman y colapsan. Este proceso de generación de burbujas y su destrucción generan ondas de choque que son usadas para calentar, concentrar, mezclar y separar. El resultado de la conversión de energía mecánica a energía calorífica.



Cuando la presión en este punto excede la presión la presión creada por esta acción centrífuga, el sentido de del flujo de agua se invierte y el agua es forzada fuera de la cavidad que se dirigirá inmediatamente a otro orificio, el proceso se refuerza continuamente, de forma tal que se crean millones de burbujas y sus consecuentes millones de ondas expansivas por minuto. Mientras que estas ondas expansivas viajan a través del líquido se forman las burbujas microscópicas y como un proceso de implosión, el calor se emite y lo absorbe el líquido. Cuando el líquido fluye sobre los bordes del orificio, las burbujas microscópicas también se forman en la capa límite del líquido en contacto con la superficie.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La unidad para convertir energía comprende los siguientes conceptos:

- Una flecha que se conecta a algún medio motriz (Motor eléctrico o de combustión interna).
- Un rotor cilíndrico rígidamente conectado a la flecha, la superficie cilíndrica del rotor resaltando un número determinado de orificios los cuales son mas profundos que su diámetro.
- Un par de sellos, cada uno sujetos a la flecha en lados opuestos al rotor.
- Una cubierta cilíndrica que redondea la superficie cilíndrica y una de las cubiertas laterales del rotor, la cubierta cilíndrica generalmente tiene forma de C visto de corte seccional axial, teniendo una superficie interior la cual ajusta estrechamente con el rotor cilíndrico y teniendo un barreno axial de suficiente diámetro. Para acomodar la flecha y uno de los sellos con espacio adicional para que el líquido fluya.
- Un primer balero conectado a la cubierta cilíndrico dando importancia a un orificio adaptado en tamaño para acomodar la flecha, un empaque se asienta contra uno de los sellos terminales, una balero para soportar la flecha y una porción hueca adaptada para acomodar la flecha y uno de los sellos con espacio adicional para el flujo de líquido.
- Un segundo balero conectado a la segunda cubierta dando importancia a un orificio adaptado en tamaño para acomodar la flecha, un empaque asentado contra uno de los sellos terminales. Un balero para soportar la flecha y una porción hueca adaptado en tamaño para acomodar la flecha y uno de los sellos con espacio adicional para que el líquido fluya.
- Al menos un puerto de entrada para permitir el flujo de un líquido dentro de la unidad.
- Al menos un puerto de salida formado en la cubierta para permitir la salida del fluido el cual ha sido calentado por la flecha giratorio y rotor actuando de acuerdo con la cubierta estacionaria y tapas con baleros.



IV).- Trabajo Experimental.

La eficiencia térmica nos indica el porcentaje de energía que es aprovechada por el fluido de proceso (agua y/o vapor) de la energía liberada en forma de calor.

A partir del balance de energía de una caldera es posible calcular la eficiencia térmica de esta de dos maneras método directo y método indirecto.

La eficiencia térmica se define como :

$$\eta_{TH} = \frac{\text{salida neta de trabajo}}{\text{entrada de calor}} \quad (\text{ecuación 9}) *$$

$$\eta = (Q_a / Q_I) * 100 \quad (\text{ecuación 10})$$

Del balance de calor tenemos que :

$$Q_A = Q_I - Q_P \quad (\text{ecuación 11})$$

Sustituyendo esta expresión en la ecuación (10) tenemos que :

$$\eta = (1 - Q_P / Q_I) * 100 \quad (\text{ecuación 12})$$

La ecuación (10) corresponde al método directo (entrada y salida de calor) para determinar la eficiencia térmica por este método es necesario obtener parámetros como son: presión, temperatura y cantidad de vapor generado (agua alimentada), temperatura de agua de alimentación, cantidad de agua transferida, revoluciones por minuto, flujo de agua

La ecuación 3 corresponde al método indirecto (pérdida de calor) para determinar la eficiencia térmica mediante este método los parámetros que deben considerarse son : la temperatura, la concentración de oxígeno, determinación del calor que se pierde a través de las paredes.

4.1.- Método de prueba.

El método de prueba que debe usarse para determinar la eficiencia térmica de la unidad de calentamiento, es el método directo o de entradas y salidas, ecuación 1.

4.2.- Condiciones del equipo :

Las condiciones que deben cumplirse para realizar la prueba de eficiencia son las siguientes :

- Equipo de medición calibrado y certificado.
- La unidad de calentamiento no debe estar afectada por otros equipos.
- Durante las pruebas no se deben de realizar purgas.
- La prueba debe efectuarse en una área con temperatura sin variación (20 °C)
- No debe de haber fugas de líquido o vapor ni infiltraciones de aire.

f).- del agua de entrada de la caldera deberá permanecer constante, con una variación¹ de $\pm 0.5 \%$

g).- La unidad deberá de probarse a su máxima capacidad, variación máxima $\pm 2 \%$

h).- La presión de prueba de la unidad debe ser la presión normal de operación y permanecer constante (variación máxima de $\pm 5 \%$)

4.3.- Variables a medir e información complementaria.

Variables a medir :

potencia. Fuerza motriz : Potencia de salida, potencia de entrada, factor de

Fluido (agua) : temperatura de entrada y de salida.

Unidad de calentamiento : RPM, flujo de agua,

Cantidad de masa de agua circulante (Inicio y final)

Información complementaria . Tiempo de experimentación.

4.4.- Condiciones generales de medición.

De acuerdo con el marco teórico expuesto la energía de salida de una unidad de calentamiento por cavitación es muy predecible. A pesar de que existen diversas características físicas que deben de tomarse en consideración, los elementos más importantes para determinar la energía de salida son los siguientes: Velocidad del rotor, el número de cavidades del rotor las tolerancias entre el rotor y la cubierta y las cubiertas laterales. El motor eléctrico deberá de tener una salida de energía similar o mayor a la cantidad de energía a la salida.

Para un diámetro del rotor (D) con un ancho de orificio (W) y un cierto número de cavidades a una velocidad fija (rpm), ocurrirá lo siguiente:

Se ha detectado que a mayor numero de cavidades bajo la misma superficie del rotor se genera una mayor cantidad de energía de salida en forma de calor.

Se tienen dos rotores con las siguientes medidas:

Rotor 1. Diámetro 30.5 cms, ancho 15.5 cms cantidad de orificios 36. (Diámetro de orificios 3.5 cms, profundidad 4 cms, ángulo de base 45 °)

Rotor 2. Diámetro 30.5 cms, ancho 15.5 cms cantidad de orificios 72. (Diámetro de orificios 1.2 cms, profundidad 4 cms, ángulo de base 45 °)

Estos rotores se probaran a diferentes velocidades y los resultados se graficaran para cada uno de los ensayos realizados.

Las pruebas se realizaron en el laboratorio de Termodinámica de la Universidad Tecnológica de

Tamaulipas en Reynosa con el responsable del laboratorio Ing. Ricardo González Sánchez. El laboratorio cuenta con aire acondicionado y se encuentra aislado de los otros laboratorios, lo cual nos asegura el mantenimiento de una temperatura constante por un largo tiempo para que no afecte las mediciones de temperatura efectuadas.

Antes de iniciar las mediciones, la unidad debe estar operando en forma continua, tal que se cumplan la condiciones señaladas en el punto condiciones del equipo.

El tiempo de prueba será de 20 minutos, las mediciones se tomarán cada 2 minutos y se registran en un formato indicado.

No de medición	Tiempo	Temperatura °C Depósito	ΔTemp. °C ganado	Totalizador (Its)	Flujo de Entrada (Its/min)	RPM	Potencia Salida	Presión
1	1							
2	2							
3	3							
4	4							
5	5							

Información complementaria :
 Presión atmosférica del lugar (Pa)
 Temperatura del Lugar (°C)
 Densidad del agua.

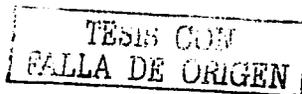
Una vez terminada la prueba se obtiene el promedio de las temperaturas, flujos, Rpm's y la cantidad total de agua utilizado en la prueba.

4.5.- Determinación de la eficiencia.

Con la información del punto Condiciones generales de medición y el calor aprovechado para sustituirlo en la ecuación 1 y obtener la eficiencia térmica..

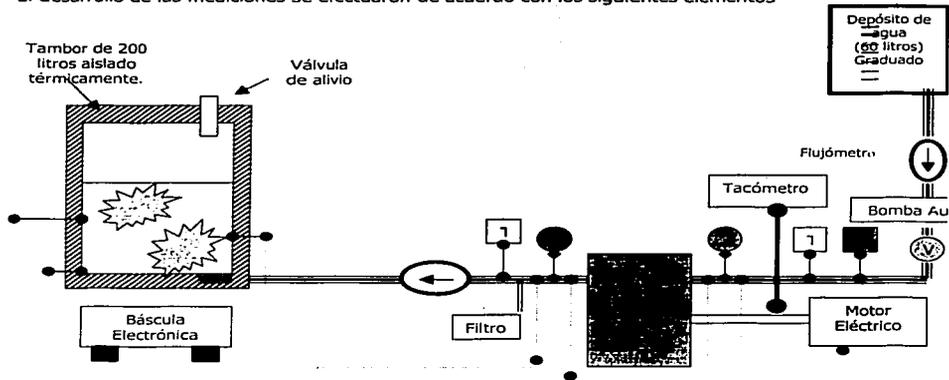
El criterio para determinar la energía de salida de la unidad de calentamiento de fluidos por medio de cavitación se basa principalmente en muchas características físicas de diseño que deben ser consideradas, los elementos más importantes que determinan la energía de salida se relacionan con la velocidad del giro del motor, el número de cavidades del rotor y de las tolerancias entre la cubierta, las placas de extremo y el rotor

Es necesario considerar en este punto que se va a calcular la eficiencia de esta unidad de calentamiento comparando la cantidad de energía para el movimiento del motor eléctrico en Kw-hr y compararlo contra la cantidad de calor que sale de la unidad, para desarrollar esta medición se considerará



4.6.- Diagrama Esquemático. Técnica experimental .-

El desarrollo de las mediciones se efectuaron de acuerdo con los siguientes elementos



T = termómetro
V = Válvula de paso.
P = Manómetro
⊖ = Flujómetro (totalizador)

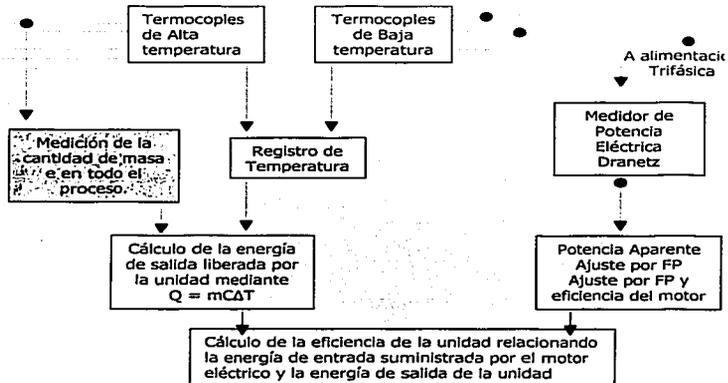


Figura 17

4.7.- Descripción de los procedimientos de prueba.

La unidad desarrollada es un cilindro con barrenos en su superficie de dos diámetros (3.5 y 1.2 cms) inmerso en una cámara cerrada, el rotor gira mecánicamente agitando el agua en su anterior produciendo ondas de choque en su interior lo que se traduce en el desarrollo de cavitación. La velocidad a la cual gira el rotor se encuentra dentro de los márgenes de 3050 a 5000 rpm, la unidad desarrollada calienta el agua debido a la fricción ordinaria y debido a un calentamiento adicional generado por el fenómeno descrito como cavitación.

En estas pruebas , un motor Lincolni de 40 HP fue usado para mover el rotor de la unidad de 30.5cms de diámetro. Antes de correr las pruebas, un tambor abierto de 200 litros, fue colocado en la bascula y fue pesado vacío (peso vacío del tambor 13.8 kilogramos). Y es llenado con 159 kilogramos de agua.

El agua es alimentada a la unidad desde un tanque de 60 litros. Un bidón graduado grande transparente fue montado en la parte superior del tanque de almacenamiento. El bidón sirve como un depósito. Se le hicieron dos marcas en dos escalas litros (mayor a un 4 litros) y kilogramos (mayor a 4 kgs). (un litro pesa aproximadamente un kilogramo) El agua es agregada en incrementos de 4 kgs a partir de un bote graduado. Se tuvo cuidado de no generar burbujas de aire en el tanque de almacenamiento. El depósito hace fácil el registro de flujo y la cantidad total de agua consumida. Es llenada la marca de 4 kgs en el comienzo de la corrida de la prueba y la cantidad agregada durante la prueba es registrada.

El agua es forzada a pasar desde el tanque de almacenamiento a través de la unidad con ayuda de una bomba de agua auxiliar de ½ HP. El flujo es regulado e indicado mediante un flujómetro. La unidad se enciende, el agua es alimentada y rápidamente se calienta dentro del periodo de 5 a 10 minutos.

Después de 10 o 15 minutos la unidad se ha calentado, el flujo y el balance de agua se estabiliza . En estas pruebas la salida fue regulada mediante la apertura y cierre manual de la válvula de salida. Después la unidad se estabilizó y los preparativos se complementaron, la corrida de prueba comenzó.

1.- Una segunda válvula localizada al final del tubo de salida es cerrada, esto corta el flujo de vapor por un momento. Una segunda es abierta, dirigiendo el vapor hacia una manguera de hule de 3 metros. El extremo de la manguera se sujeta firmemente a la base del tambor de acero llenado con agua fría . El remolino de vapor entra al depósito y se condensa, rápidamente el agua eleva su temperatura. La entalpía del vapor generado es capturado por condensación. Esta es una técnica efectiva, virtualmente todo el vapor se condensa, capturando la energía térmica, y el vapor generado empuja el agua con considerable fuerza, el cual la mayor parte de energía cinética del vapor generado. (ver figura 17)

2.- Al mismo tiempo el vapor generado es redirigido mediante aire al tambor de acero lleno de agua el potenciómetro es ajustado, así es que el total de energía eléctrica gastado para el movimiento de la unidad es registrado a partir de ese momento. El potenciómetro imprime las lecturas instantáneas de Kilowatts cada minuto, se imprime un subtotal gastado de Kilowatts de potencia a cualquier tiempo durante la prueba en marcha, y al final se imprime el total de Kilowatts-hora utilizados.

3.- La temperatura del agua en el tambor de acero y los niveles de potencia instantáneos son registrados manualmente cada dos minutos en la bitácora. Las lecturas de temperaturas fueron tomadas a diferentes profundidades y el agua es agitada vigorosamente con una pala para asegurar que las lecturas de temperatura son uniformes, porque el vapor esta agitándose en la parte inferior del agua y se calienta esa parte.

4.- Periódicamente, 4 kilogramos de agua son agregadas al deposito y se registra los datos obtenidos en la bitácora.

5.- Después de un periodo de 30 minutos a una hora, el motor eléctrico que mueve a la unidad se apaga. La temperatura de cierre es tomada. En este punto el vapor remanente se aloja dentro del tambor , lo cual incrementa la temperatura 4 a 5 °C y agrega 1.36 kgs de agua. Este aumento extra de energía podría no estar incluida dentro de los totales, debido a que este sería considerado como energía latente o almacenada que fue capturada en la unidad y tubos antes de que la prueba comenzara. Por consiguiente, en este reporte se han usado las lecturas de temperatura de cierre tomadas antes de dar salida al vapor. Se pesó la masa de agua en este punto.

6.- El tambor de acero se aisló térmicamente (se recubrió con colchonetas de fibra de vidrio) es colocado sobre la báscula y es pesado. La cantidad total de agua consumida, como se midió en el depósito, se compara con el incremento en el agua en el tambor de acero. Los números se comparan estrechamente dentro de 1 a 1.5 kgs abasteciendo la mayor cantidad de vapor es condensado y capturado. Si el vapor no es liberado en el ultimo paso, la masa final en el depósito serán probablemente unos pocos kilogramos de cantidades consumidas, debido a que una pequeña cantidad de agua se perdería por evaporación en el aire desde la superficie del agua en el depósito. Si el vapor es liberado, la masa final en el depósito podría exceder la cantidad alimentada dentro del depósito por unos pocos kilogramos. Donde existe una discrepancia de mediciones, se tomaron la figura mas bajas. Las Kilocalorías contenidas de 1.5 kilogramos de masa de agua es despreciable, en cualquier caso, por ejemplo en la prueba 2, los 1.5 kilogramos de masa de agua cambiarían el registro de energía de salida por unos 0.8%.

La cantidad de calor (Q) requerida para cambiar la temperatura de una sustancia es proporcional a la masa (m) de la sustancia y al cambio en la temperatura (ΔT). Esto es $Q \sim m \Delta T$ o en forma de ecuación:

$$Q = m c \Delta T$$

Aquí $\Delta T = T_f - T_i$ es el cambio de temperatura o la diferencia entre la temperatura inicial (Ti) y la temperatura (Tf), y c se llama la capacidad calorífica específica.

Al escribir la ecuación $Q = m c \Delta T$, vemos que las unidades del calor específico son J/kg-K o kcal/kg-°C (o cal/g-°C en unidades cgs). La unidad SI estándar para el calor específico es una en la que la temperatura está en kelvin. Sin embargo, el uso de la temperatura Celsius en esta unidad (dando J/kg-°C) es aceptado comúnmente pues el tamaño de un grado Celsius es el mismo que el tamaño de un kelvin. El calor específico es la cantidad de energía requerida para elevar 1 °C la temperatura de 1 Kg. de una sustancia (o 1 °C la de 1 g de sustancia) El calor específico depende en parte de la temperatura (y de la presión) pero se puede considerar este efecto como despreciable. El agua tiene un calor específico relativamente grande de 1.00

kcal/jg-°C. El valor es exactamente 1.00 porque la definición de kilocaloría establece que 1 kcal eleva la temperatura de 1 kg de agua 1 °C

7.- El total de energía de salida es comparado en Kcal se multiplica la masa de agua y por el calor específico del agua 1 kcal/°C Kg , por el incremento de temperatura en grados centígrados. El total de energía de entrada , como se registro en el indicador de potencia se compara con la cantidad total de energía de salida.

8.- La potencia de energía fue monitoreada con un analizador de potencia eléctrica de demanda marca Drantez modelo 808, el cual fue calibrado por General Electric en octubre del 2001. En pruebas previas el analizador Drantetz fue instalado en paralelo. De acuerdo con las especificaciones del analizador el máximo error en carga máxima es de 1.5 %. A carga total para esta medición es 800 KW, los niveles de potencia durante estas pruebas variaron desde 14 a 23 KW. En estos bajos niveles , los errores serán menores que 0.5 %.

9.- La temperatura fue medida con dos termómetros electrónicos los cuales tienen divisiones de 1°C y un termómetro comercial con incrementos marcados de 1°C, los cuales están de acuerdo con los termopares electrónicos. Cinco termopares tipo J fueron es también usados para medir la temperatura del agua y la temperatura de superficie de la unidad, el motor eléctrico y los tubos. El termopar se ajusta directamente con los termómetros. Esto nos servirá para comparar las mediciones de los instrumentos y hacer un cruce de información para verificar que los datos recolectados no tienen un margen de error significativo, que nos llevaran a pensar que alguna medición. Esto nos ayuda a respaldar las mediciones.

10.- La calibración de la báscula fue efectuada el 20 de noviembre del 2001, por el NOM. Personal SECOFI trajo patrones con los cuales verificaron la exactitud de la escala y se determina que la báscula estaba calibrada a toda su capacidad de 500 kilogramos.

4.8 Algunas consideraciones referentes al registro de potencia de entrada.

Estas son dos importantes factores que deberán mantenerse en mente cuando se evalúan la potencia de entrada en estos experimentos.

1.- La eficiencia o rendimiento de un motor eléctrico es una medida de su habilidad para convertir la potencia eléctrica que toma de la línea en potencia mecánica útil. Se expresa usualmente en porcentaje de la relación de la potencia mecánica entre la potencia eléctrica esto es :

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Potencia Mecánica}}{\text{Potencia Eléctrica}} \times 100$$

No toda la energía eléctrica que un motor recibe , se convierte en energía mecánica. En el proceso de conversión, se presentan pérdidas. Si las condiciones de operación de un motor son incorrectas o este tiene algún desperfecto, la magnitud de las pérdidas, puede superar con mucho las de diseño, con la consecuente disminución de la eficiencia. Para calcular la eficiencia, las unidades de potencia deben ser iguales. Como la potencia eléctrica se expresa en Kilowatts en tanto la potencia mecánica en caballos de potencia (HP), las siguientes,

equivalencias son útiles para la conversión de unidades.

0.746 KW = 1 HP (1 KW = 1.34 HP), por lo tanto si un motor de 100HP toma de la línea 87.76 KW

Potencia mecánica = $100 \times 0.746 \text{ KW} = 74.6 \text{ KW}$

Eficiencia = $(74.6 / 87.76) \times 100 = 85 \%$, Pérdidas = $87.76 - 74.6 = 13.16 \text{ KW}$

2.- Un motor eléctrico trabaja mas eficientemente en el nivel mas alto para el cual fue diseñado. Cuando un motor eléctrico trabaja a una carga muy baja a la que fue diseñada, la diferencia entre la potencia aparente (Volts por Amperes) y la "Potencia Verdadera" llega a ser grande. La relación entre la "Potencia Real" dividida entre la "Potencia aparente" es conocida como el factor de potencia (FP). Este factor está descrito en muchos libros básicos de corriente alterna. El factor de potencia es registrado automáticamente por el Analizador Dranetz y un promedio del factor de potencia para la prueba es desplegado en pantalla.

En estas pruebas, un motor de 40 HP fue usado para dar movimiento a un rotor de 30.5 cms de diámetro, así que el factor de potencia fue menor que otras pruebas observadas, variando del 73 al 84 %. Un motor de 30 HP podría ser mas apropiado para esta unidad tendríamos un rendimiento alto factor de potencia.

3.- Todos los motores eléctricos sufren un grado de pérdida de potencia mecánica. La conversión de la electricidad a movimiento rotatorio no puede ser 100 % eficiente. El motor usado en esta prueba tiene una eficiencia nominal de 82.5 % por el fabricante. La perdida de energía aparece en forma de pérdida de calor. Los motores de este tamaño pueden generar una gran cantidad de calor y ellos son equipados con ventiladores para cuidarlos de un sobrecalentamiento.

V.- Resultados.

Prueba 1.- Con flujo constante de 15 psi y un flujo de rango entre 0.0025 a 0.00317 lt/seg .

Rotor 1. Diámetro 30.5 cms, ancho 15.5 cms cantidad de orificios 36. (Diámetro de orificios 3.5 cms, profundidad 4 cms, ángulo de base 45 °)

Inicialmente se tuvo problemas en el flujo y presión mantenida por la unidad, no se obtuvo un efecto medible. Así es que se dirigió al balance de entrada y salida y atraer a la unidad a una posición fija, así es que se decidió permitir trabajar la unidad por un periodo de una hora produciendo un pequeño exceso de calor o no producirlo. El flujo estuvo por debajo del rango de operación de 0.033 litros por minuto. Los resultados se describen a continuación:

Masa inicial y temperatura de agua en el depósito 159 kgs a 12.7 °C

El agua al ser introducida al alimentador tiene una temperatura de 12.7 °C

Masa y temperatura final del agua en el depósito 170.74 kgs a 52.7 °C

Diferencia de temperatura $\Delta T = 40$ °C

Energía agregada al agua $40^{\circ}\text{C} \times 170.74$ kilogramos = 6829.6 Kcal lo cual equivale a 7.94 KW

Es importante recordar que toda el agua que ha pasado y terminado del tambor se encontraba a 12.7 °C. La temperatura ambiente fue ligeramente alta alrededor de 17.22°C pero esta gran masa de agua podría no absorber ninguna significativa cantidad de calor del ambiente a pesar de la diferencia de 4.52 °C porque este fue calibrado arriba de la temperatura ambiente por la unidad a 6 minutos cuando se hizo la prueba.

Potencia de entrada : 13.46 KW

Dragnet PF : 73 %

Cálculos COP (COP es la energía de salida dividida por la de entrada expresada como porcentaje)

Potencia	Potencia de entrada en KWH	COP
Aparente	13.46	$(7.94/13.46) = 58.9 \%$
Ajustada por PF	9.83 $(13.46 * 0.73 \%)$	$(7.94/9.83) = 80.77 \%$
Ajustada por PF y eficiencia del motor	8.12	$(7.94/8.12) = 97.77 \%$

Conclusión : Estos datos están cerca del balance de entrada y salida. Debido a que ha existido una significativa pérdida radiante, con ningún exceso de calor. La expectativa es que el COP sería menor que el 54 %, así es que estos resultados pueden indicar un efecto pequeño.

Prueba 2 .- Con flujo constante de 15 psi y un flujo de rango entre 0.0025 a 0.0031 lt/seg . El flujo estuvo por debajo del rango de operación de 0.033 litros por minuto.

Rotor 2. Diámetro 30.5 cms, ancho 15.5 cms cantidad de orificios 72. (Diámetro de orificios 1.2 cms, profundidad 4 cms, ángulo de base 45 °)

Los resultados se describen a continuación

Masa inicial y temperatura de agua en el depósito 155 kgs a 11.5 °C

El agua al ser introducida al alimentador tiene una temperatura de 11.5 °C

Masa y temperatura final del agua en el depósito 172.14 kgs a 52.1 °C

Diferencia de temperatura $\Delta T = 40.6$ °C

Energía agregada al agua 40.6 °C x 172.14 kilogramos = 6988.88 Kcal lo cual equivale a 8.12 KWhr

Es importante recordar que toda el agua que ha pasado y terminado del tambor se encontraba a 11.5 °C. La temperatura ambiente fue ligeramente alta alrededor de 17.22°C pero esta gran masa de agua podría no absorber ninguna significativa cantidad de calor del ambiente a pesar de la diferencia de 5.72 °C porque este fue calibrado arriba de la temperatura ambiente por la unidad a 6 minutos cuando se hizo la prueba.

Potencia de entrada : 13.72 KW

Dranetz PF : 75 %

Cálculos COP (COP es la energía de salida dividida por la de entrada expresada como porcentaje)

Potencia	Potencia de entrada en KWH	COP
Aparente	13.72	$(8.12/13.72) = 59.18 \%$
Ajustada por PF	10.29 $(13.46 * 0.75 \%)$	$(8.12/10.29) = 78.9 \%$
Ajustada por PF y eficiencia del motor	8.72	$(8.12/8.72) = 93 \%$

Conclusión : Estos datos están cerca del balance de entrada y salida. Debido a que ha existido una significativa pérdida radiante, con ningún exceso de calor. La expectativa es que el COP sería menor que el 93 %, así es que estos resultados pueden indicar un efecto pequeño.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Prueba 3.- Con flujo constante de 25 psi y un flujo de rango entre 0.0033 a 0.0833 lt/seg .

Rotor 1. Diámetro 30.5 cms, ancho 15.5 cms cantidad de orificios 36. (Diámetro de orificios 3.5 cms, profundidad 4 cms, ángulo de base 45 °)

Después de encendida y calentada la unidad por un periodo de 5 a 10 minutos, con las válvulas de flujo de entrada salida y otros parámetros y después de 20 minutos, se inició la introducción de agua a un flujo de 0.0125 litros por segundo y la potencia trazada en kilowatts y alineado, entonces el efecto aparece, la válvula de ventilación y el vapor de salida fue cerrada , la válvula principal dentro del depósito fue abierta y se recogió el vapor generado dentro de un periodo de 19 minutos y 40 segundos. Al terminar la prueba cuando se cierra un interruptor general el cual corta la energía de todos los controles. El alimentador de potencia principal no tuvo falla, pero este se mantuvo por relevadores los cuales son abiertos. El registro de potencia Dranetz tuvo un resoplado de una batería, por lo tanto ningún dato fue perdido. Todos los datos obtenidos son de cronómetros digitales marca Casio .

Los resultados fueron como a continuación se indican

Masa inicial y temperatura del agua en el depósito principal; 159 kgs a 11.66°C.

Masa y temperatura final en el depósito final; 173 kgs , 39.5 °C

Diferencia de temperatura del agua ; 27.84 °C

Energía agregada al agua $27.84\text{ °C} \times 173\text{ kgs} = 4816.32\text{ Kcal}$ lo cual equivale a 5.6 KWH

Potencia de entrada indicada por Dranetz = 7.7 KWH

PF Dranetz = 84 %

Potencia	Potencia de entrada en kWH	COP
Aparente	7.7 kW	(5.6/7.7) 72.7 %
Ajustada por PF	(6.02 X 0.84) = 6.48	(5.6/6.48) 86.42 %
Ajustada por PF y eficiencia del motor	6.02	(5.6/6.02) 93.02 %

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Prueba 4.- Con flujo constante de 25 psi y un flujo de rango entre 0.033 a 0.0083 lt/seg .

Rotor 2. Diámetro 30.5 cms, ancho 15.5 cms cantidad de orificios 72. (Diámetro de orificios 1.2 cms, profundidad 4 cms, ángulo de base 45 °)

Después de encendida y calentada la unidad por un periodo de 5 a 10 minutos, con las válvulas de flujo de entrada salida y otros parámetros y después de 20 minutos, se inició la introducción de agua a un flujo de 0.0125 litros por segundo y la potencia trazada en kilowatts y alineado, entonces el efecto aparece, la válvula de ventilación y el vapor de salida fue cerrada , la válvula principal dentro del depósito fue abierta y se recogió el vapor generado dentro de un periodo de 19 minutos y 40 segundos. Al terminar la prueba cuando se cierra un interruptor general el cual corta la energía de todos los controles . El alimentador de potencia principal no tuvo falla, pero este se mantuvo por relevadores los cuales son abiertos. El registro de potencia Dranetz tuvo un resoplado de una batería, por lo tanto ningún dato fue perdido. Todos los datos obtenidos son de cronómetros digitales marca Casio .

Los resultados fueron como a continuación se indican

Masa inicial y temperatura del agua en el depósito principal; 159 kgs a 11.66°C.

Masa y temperatura final en el depósito final; 173.7 kgs , 41.5 °C

Diferencia de temperatura del agua ; 29.84 °C

Energía agregada al agua 29.84 °C x 173.7 kgs = 5183.2 kcal lo cual equivale a 6.03 kWh

Potencia de entrada indicada por Drantez = 7.75 kWh

PF Drantez = 89 %

Potencia	Potencia de entrada en kWh	COP
Aparente	7.75 KW	(6.03/7.7) 72.7 %
Ajustada por PF	(7.75 X 0.89) = 6.89	(6.03/6.89) 87.51 %
Ajustada por PF y eficiencia del motor	6.14	(6.03/6.14) 98.20 %

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Prueba 5.- Con flujo constante de 45 psi y un flujo de rango entre 0.0095 a 0.0158 lt/seg .

Rotor 1. Diámetro 30.5 cms, ancho 15.5 cms cantidad de orificios 36. (Diámetro de orificios 3.5 cms, profundidad 4 cms, ángulo de base 45 °)

Esta prueba se efectuó en un tiempo de 30 minutos.

Los resultados fueron como a continuación se indican:

Masa inicial y temperatura del agua en el depósito principal; 159 kgs a 11.66 °C

Masa y temperatura final del depósito final : 178 kgs 50 °C

Diferencia de temperatura del agua :38.34 °C

Energía agregada al agua : 38.34 °C x 178 kgs = 6824.52 Kcal, lo cual equivale a 7.93 KWH

Potencia de entrada indicada por Drantex = 9.7 KWH

Corrección por factor de potencia : 84 %

Cálculos COP

Potencia	Potencia de entrada en KWH	COP
Aparente	9.7 KWH	$(7.93/ 9.7) = 81.75 \%$
Ajustada por PF	$(9.23 \times 84 \%) 8.15$	$(7.93/8.15)= 97.3 \%$
Ajustada por PF y eficiencia del motor	7.95	$(7.93/7.95) = 99.73\%$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Prueba 6.- Con flujo constante de 45 psi y un flujo de rango entre 0.0095 a 0.0158 lt/seg .

Rotor 2. Diámetro 30.5 cms, ancho 15.5 cms cantidad de orificios 72. (Diámetro de orificios 1.2 cms, profundidad 4 cms, ángulo de base 45 °)

Esta prueba se efectuó en un tiempo de 30 minutos.

Los resultados fueron como a continuación se indican:

Masa inicial y temperatura del agua en el depósito principal; 159 kgs a 11.5 °C

Masa y temperatura final del depósito final : 174 kgs 51.1 °C

Diferencia de temperatura del agua : 39.6 °C

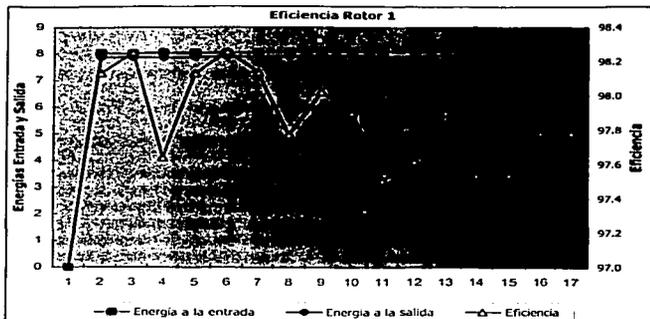
Energía agregada al agua : 39.6 °C x 176 kgs = 6890.4 Kcal, lo cual equivale a 8.01 KWH

Potencia de entrada indicada por Drantez = 10.1 KWH

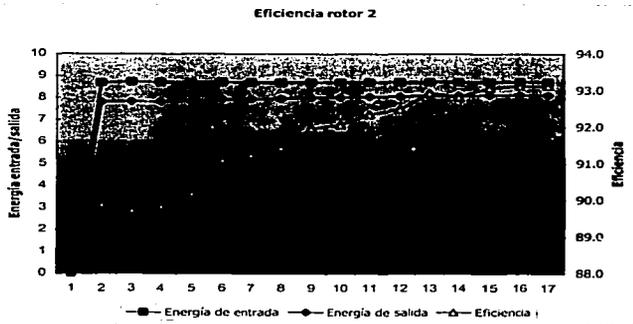
Corrección por factor de potencia : 84 %

Cálculos COP

Potencia	Potencia de entrada en KWH	COP
Aparente	10.1 KWH	$(8.01/9.7) = 82.55 \%$
Ajustada por PF	$(10.1 \times 84 \%)$ 8.48	$(8.01/8.15) = 98.3 \%$
Ajustada por PF y eficiencia del motor	8.10	$(8.01/8.10) = 98.8 \%$



Prueba 1.

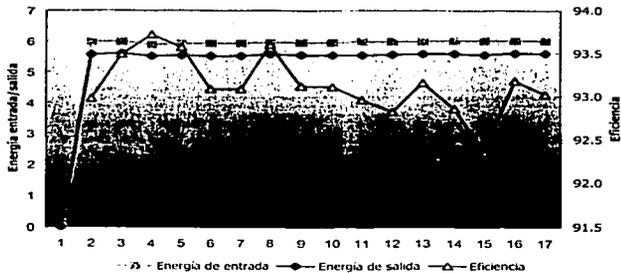


Prueba 2.

47

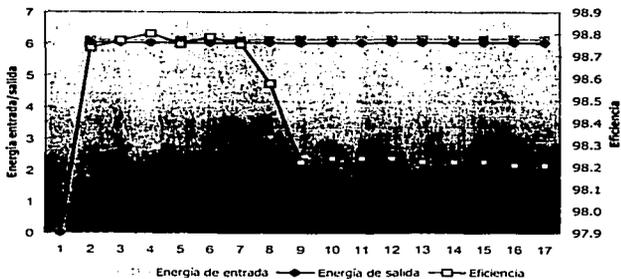
FALLA DE ORIGEN

Eficiencia rotor 1



Prueba 3

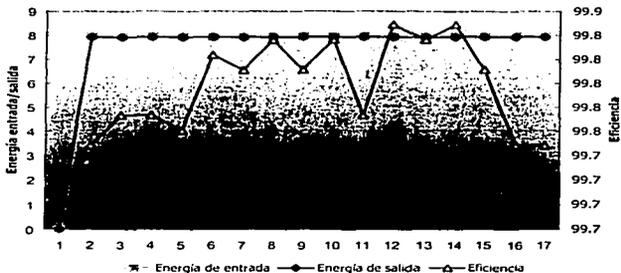
Eficiencia rotor 2



Prueba 4.

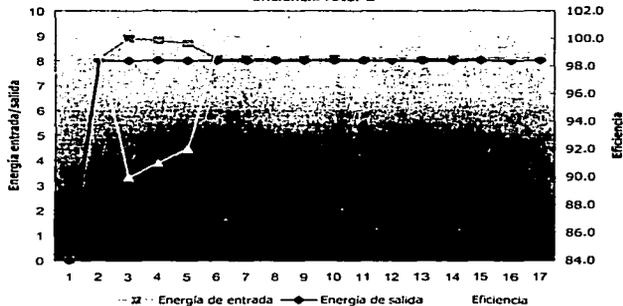
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Eficiencia rotor 1



Prueba 5.

Eficiencia rotor 2



Prueba 6

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

VI.- Discusión

1.- Esta unidad tiene un margen de desempeño, definido por un conjunto de indicadores, presión, velocidad de rotación, etc.. Si operamos esta unidad abajo o arriba de la ventana de desempeño de esta unidad en particular no se produciría el calor. Este hecho esta soportado en base al marco teórico expuesto, no todas las burbujas nos sirven para este propósito tenemos que obtener un tamaño de burbuja específico, gran cantidad y que se mantenga por un tiempo definido y consecuentemente, esto sea reproducible cuando se active la unidad en cuestión.

2.- La unidad usada en estos experimentos fue un diseño experimental, optimizado para crear vapor y no agua caliente. La unidad evaluada desafortunadamente tiene un muy estrecho margen de desempeño. Esta unidad trabaja mejor con un flujo entre 0.57 y 0.95 litros por minuto. Asimismo requiere relativamente de alta presión de entrada 45 psi. Esto es mucho mas difícil de ajustar que algunos de los medios previos, pero tiene un alto COP y produce vapor puro sin la mezcla de agua en ebullición (es vapor seco no salen gotas) .

3.- Durante la experimentación, se tuvo la dificultad de obtener un balance entre el agua introducida y el vapor de agua de salida. Se demostró que pasa cuando el flujo es demasiado bajo, el agua dentro del compartimiento estrecho alrededor del rotor giratorio repentinamente se vacía, se genera vapor. Esta "descarga" hace que el motor gire libremente y que los niveles de potencia aumenten y que sean comprobables a cuando el motor se trabaja sin agua aumentando su potencia en aprox. 4 Kw Determinado lo anterior lo que podemos hacer para controlar el flujo es colocando una válvula de paso en la entrada y la salida para regular el flujo de agua dentro de la unidad. Al abrir gradualmente la válvula de salida me permitirá balancear el flujo necesario para asegurarlo en el momento del inicio de salida de vapor.

4.- Una vez conseguido el balance la unidad tiende a permanecer en ese estado largos periodos de tiempo, hasta que se apague la unidad. Por lo tanto concluimos que el balance es muy importante para la obtención de vapor y que el flujo de agua suministrada es muy bajo.

Una operación normal de la unidad en un sitio de trabajo tendría que ser equipado con un control de flujo y válvulas de control de presión prefijados. Con esto se aseguraría un balance adecuado y mas rápido.

5.- Cuando la unidad este totalmente llena o algunos parámetros operativos de la rango de desempeño no sean adecuados la unidad genera exactamente tanto calor como se podría esperar por otra maquina agitadora, de acuerdo a los experimentos básicos experimentos de J. P. Joule. Cuando el flujo y presión alcanzan su indicador correcto, el efecto aparece y este hecho es fácil de observar cuando el flujo de agua permanece constante, y una nube de vapor sale, permaneciendo constante, pero la potencia eléctrica disminuye en un rango del 20 a 50% es decir de 23 a 14 KW. En este punto la unidad hace sonidos los cuales cambian notablemente (martilleo o cavitación). En ocasiones la disminución en la potencia indica una fluctuación haciendo un efecto similar a cuando se enciende y apaga, pero al estabilizarse la unidad estará produciendo la misma cantidad

de vapor como antes. Con menos electricidad que la usada previamente.

Como la unidad no está produciendo exceso de calor la potencia indicada en kilowatts en el indicador Dranetz son proporcionales al flujo, incrementando la entrada si la válvula de flujo abre y disminuyendo cierra, tal y como se esperaría. Cuando el efecto de exceso de calor aparece, la potencia de entrada no tiene cambios significativos en respuesta a los ajustes al flujo.

6.- La energía liberada en forma de vapor por la unidad de calentamiento de fluidos esta directamente relacionada con el número y diseño de los orificios que provocan la cavitación. Esto se debe claramente a que en un orificio mas pequeño la diferencia de presiones es lo suficientemente alta para generar la cavitación y haciendo relación con el marco teórico donde se desarrollo burbujas con una boquilla de 5 mm se alcanzaron a una frecuencia de 25 KHZ, suficiente para provocar las ondas de choque necesarias para crear la burbuja , su colpsamiento y su consecuente liberación de energía, que sumadas a los millones de burbujas generadas provocan un incremento de temperatura en el líquido

7.- Cuando se aumenta el número de orificios así como el diámetro de los mismos, la cantidad de energía a la salida se verá incrementada en un porcentaje proporcional al numero de cavidades adicionales. Una unidad de calentamiento de 30.5 cms de diámetro , 15.5 cms de ancho, conteniendo 36 orificios con un diámetro de 4 cms, girando a 3600 rpm se generaran 6426 Kcal (7.47 kW-hr) . Si el ancho del rotor se incrementa a 5 cms y ahora contiene 72 orificios (diámetro del orificio 1 cm), la producción de energía se incrementará a 12,978 Kcal (15.090 Kw-hr) (un incremento de 100 %).

8.- Aunque la medición de la eficiencia de la unidad de se efectuó mediante la medición de las energías de entrada y salida de la unidad. Pudimos verificar la temperatura de la unidad de calentamiento existiendo una variación de 1°C en la temperatura de la unidad de calentamiento (inicialmente la unidad tenia una temperatura de 16 grados al finalizar la prueba no llego mas arriba de 17 °C) es decir existe un fenómeno donde la por medio de la cavitación solo genera calor dentro del líquido y no se traspasa hacia las paredes de la unidad. Esto permite suponer que no existiendo pérdidas en la unidad por transferencia hace más eficiente a la unidad.

9.- De acuerdo con las gráficas obtenidas, se evidencia que a mayor número de orificios y a mayor velocidad se obtendrá una mayor cantidad de energía en forma de vapor. Esto puede tener utilidad para determinar si se requiere agua caliente o vapor. La dependencia entre estos factores y la energía liberada nos pueden ayudar a planear unidades de calentamiento mas grandes o mas pequeñas de acuerdo a las necesidades específicas.

10.- Cuando se incrementa el diámetro y/o la velocidad angular (rpm) se incrementa la velocidad superficial del rotor y la energía de salida se incrementará exponencialmente. Para una unidad de calentamiento de 30.5 cms de diámetro y un ancho de 15.5 cms, girando a una velocidad de 10,800 rpm's producirá 675,360 Kcal (785.3 Kw-hr) en comparación de 6,426 Kcal a 3600 rpms.

Podemos suponer entonces valores mayores en forma proporcional al tamaño de la unidad de calentamiento de fluidos.

11.- Con el incremento en presión de entrada en el circuito la eficiencia de la unidad de calentamiento de fluidos aumenta de manera proporcional hasta un límite de 75 psi.

12.- Se encontró que el controlar la cavitación es efectivo para calentar fluidos, a disminuyendo la idea de que la cavitación solo provoca deterioro en los materiales. Aunque se probó con agua, no se determinó para otro tipos de fluidos (aire, o líquidos mas viscosos) Esto sería recomendable efectuar algunos ensayos para observar su desarrollo

13.- Haciendo una comparación entre la eficiencia térmica de caldera de baja capacidad (7.5 a 100 KW) y una unidad de calentamiento de fluidos en donde nos interesa la cantidad de vapor generado podemos considerar lo siguiente :

- La unidad de calentamiento tuvo un rendimiento de hasta 98 %, que comprado con una caldera es del 87 %. Esta diferencia del 9 % significa un ahorro de costos inicialmente.
- La unidad de calentamiento de fluidos es un mecanismo simple comparado con el grado de complejidad de una caldera. Consecuentemente el mantenimiento es mucho mas fácil y rápido. (En la unidad estudiada tuvimos problemas de fugas de agua en los retenes, por haber colocado retenes económicos (400 pesos), la recomendación por parte del vendedor de sellos mecánicos es adquirir un sello especial de un costo de 2400 pesos).
- El fenómeno de cavitación bien controlado no provoca descascamiento y/o contaminación en comparación con una caldera que primero tenemos que calentar una superficie metálica, para que esta a su vez caliente el agua (Aqui existe una pérdida de calor que hace menos eficiente a una caldera). En este proceso que lo podemos observar en las ollas de nuestra casa, no se presenta en una unidad de calentamiento por cavitación.
- Con referencia a los puntos citados anteriormente podemos decir que el costo de una caldera es 635 % mas caro que esta unidad de calentamiento, y que tiene menor cantidad de elementos que una caldera. Considerando este punto creo que se puede aumentar aun mas la eficiencia si el rotor es hueco y no un cilindro sólido, ya que requerirá menor cantidad de energía para su movimiento y esto me permitirá aumentar su velocidad de rotación, que como ya vimos es un factor importante en la generación de vapor.
- Por ultimo podemos indicar que la única fuente que requiere esta unidad es un movimiento mecánico (ya sea de un motor eléctrico como en nuestro caso) y no requiere de algún tipo de combustible (como en la caldera), en donde hace mas riesgoso su operación.

14.- Cabe mencionar que durante el desarrollo de las pruebas se colocaron varios instrumentos para respaldar y verificar la información que se obtenía del ensayo, únicamente fuimos dos personas las que tomamos los datos. De acuerdo a la experiencia es necesario por lo menos 5 personas mas para la toma de datos muy especifica, sin problemas de traslado en los momentos de llenado de formatos con información.

VII).- Conclusiones.

Este trabajo se desarrolló con el único objetivo analizar la eficiencia de una máquina de calentamiento de fluidos basado en principio de cavitación para comprobar la afirmación por parte de sus desarrolladores de que máquinas de este tipo son más de 100 % eficientes.

Teóricamente es imposible llegar al 100 % de eficiencia tal como lo establece la Segunda Ley de la Termodinámica, por lo anterior el enfoque de este trabajo fue el de comprobar esta afirmación.

La eficiencia de esta unidad dentro de su margen óptimo de operación es del 97 %; comparando esta eficiencia con algunos calentadores de agua o generadores de vapor los cuales poseen intervalos de eficiencia entre 60-90 %, Existe un margen superior de cerca del 7% mayor de eficiencia en el mejor de los casos donde el tipo de máquinas analizadas posee mejor rendimiento que las convencionales.

Las ventajas que representan obtener un índice de eficiencia tan alto se ven reflejados en costos de operación, además de que las máquinas de calentamiento de fluidos bajo el principio de cavitación tienen ventajas sobre las calentadores convencionales:

- Construcción y mantenimiento reducidos, debido a lo simple del diseño.
- Reducción de partículas contaminantes al no utilizar combustibles fósiles.
- La cavitación controlada calienta el fluido y no las paredes de la máquina, aprovechando en mayor porcentaje el calor desarrollado al contrario de los calentadores de gas donde la fuente de calor se transmite al tanque de calentamiento y este a su vez al fluido, creando un problema adicional, la oxidación de las paredes del tanque. En las máquinas de calentamiento por cavitación no se encuentra este problema.
- Con niveles del 97 % de eficiencia los ahorros de energía son mayores que en cualquier calentador convencional.

Esta unidad en el mejor margen de desempeño, Flujo entre 0.57 y 0.95 litros por minuto y una alta presión de entrada 45 psi con el rotor de 72 orificios, genera vapor seco de la misma calidad que una caldera de pero a un costo menor.

VIII).- Bibliografía :

- 1.- Cavitation. Young Ronald. Ed. Imperial College Press. Cap. 1 pag 4-5, Cap 2 pag 33-37, Cap.4 215-219, Cap 8 , 1999
- 2.- Mecánica de Fluidos y máquinas Hidráulicas, Claudio Mataix. Ed. Harla pags 318-322.
- 3.- Flynn, H.G. Physical Acoustics Vol. 1B W.P. Mason Editorial Academic Press, cap. 9 p 76 1964.
- 4.- Norma Oficial Mexicana NOM-012-ENER-1996, Eficiencia Térmica de calderas de baja capacidad (7.5 a 100 KW) especificaciones y métodos de prueba.
- 5.- Kenneth Wark Jr. Termodinámica. 5a Edición. Mc Graw Hill. Pag 4,
- 6.- Cavitation Bubbles in a starting submerged water jet. N. Nakano, M. Hayakawa , S. Fujikawa and T. Yano . Fourth Cavitation Symposium . Hokkaido Sapporo
- 7.- Modeling of thermal behavior inside a cavitation bubble. Boonchai Lertnuwat, Kazuyasu Sugiyama and Yoichiro Matsumoto. Fourth Cavitation Symposium . Hokkaido Sapporo
- 8.- Batchelor G.K. Una introducción a Fluidos mecánicos. Cambridge University Press, 1967
- 9.- Jerry D. Wilson. Física. Pearson Education. Pags364-370, 400-405.
- 10.- Carl D. Shield, Calderas, tipo características y funciones. CECSA 1982. pags 123-124
- 11- Chemistry Induced by Hydrodynamic Cavitation. Kenneth S. Suslick,* Millan M. Mdleleni, and Jeffrey T. Ries. Department of Chemistry. UniVersity of Illinois at Urbana-Champaign
- 12.- Gilmore, F.R. Hydrodynamics Laboratory Report 26-4 , California Institute of Technology, 1952.
- 13.- Schneider A. J.R. PhD Tesis California Institute of Technology, 1949.
- 14.- Brand R.S. Technical report 1, School of Engineering, University of Connecticut, 1962.
- 15.- Akulichev, V.A High Intensity ultrasonic Fields, L.D. Rosenberg (ed) Plenum Press p.233, 1971.
- 16.- Amdt, R.E.A. cavitation in fluid machinery and hydraulic structures. Ann. Rev. Fluid Mechanics 13, 273-328.
- 17.- Ooi, K.K. 1985 Scale effects on cavitation inception in submerged water jets: a new look. J. Fluid Mechanics 151, 367-390.

18.- Gopalan, S., Katz, J. And Knio, O. 1994 The flow structure in the near field of jets and its effect on cavitation inception. Journal Fluid Mechanics 398, 1-43

19.- Chahine, G.L. y Genoux, Ph. F. 1983 Collapse of a cavitatingvortex ring. Journal Fluids Engineering 105, 400-405

20.- Patente US No. 2,316,522 desarrollada por J.E Loeffler en abril 13 de 1943

21.- Patente US No. 3,508,402 desarrollada por V.H. Gray en abril 28 de 1970.

22.- Patente US No. 3,690,302 desarrollada por P.J. Reynolds en septiembre 12 de 1972.

22.- Patente US No. 4,381,762 desarrollada por A.E Ernst en mayo 3 de 1983

23.- Patente US No. 4,779,575 desarrollada por EW Perkins

Anexo 1.-

4.4.- Instrumentos y equipo de medición :

Los instrumentos y equipos para la medición de los parámetros indicados se encuentran en el anexo I.

4.4.1.- Indicador de presión del vapor generado, manómetro de la unidad.

Manómetro marca Omega modelo PGL-25L-200 para bajas presiones tipo H. 0.5% de exactitud en toda la escala, acero Inoxidable, Protección contra sobrepresión de 150 %, Tornillo de ajuste y calibración

4.4.2.- Medidor de flujo del agua de alimentación.

Flujómetro Marca Omega capacidad de .00315 lt/seg a .113 lt/seg de agua ± 4 % exactitud en escala completa, ± 1 % de repetibilidad a escala completa. Montaje en cualquier posición, presión máxima de trabajo 3000 PSIG. Máxima temperatura de trabajo 115.55 °C

4.4.3.- Termómetros para medir la temperatura del agua de alimentación.

Termómetro modelo ASTM-2C Uso general inmersión parcial Rango -5 a 110°C, divisiones 1°C, longitud 287 mm, profundidad de inmersión 57 mm

4.4.4.- Termopares tipo J para medir la temperatura la temperatura de agua a la entrada y salida de la unidad.

La medición de temperatura utilizando termopares se base en el efecto termoelectrico. Los termopares consisten en dos hilos soldados. Los hilos son de distintos metales o aleaciones . Las normas DIN IEC 584 definen los valores básicos de voltaje termoelectrico y tolerancias máximas de los termopares. Los termopares más frecuentes son NiCr-Ni (tipo K) y Fe-Co (tipo J). Los termopares son rápidos y tienen un amplio rango de medición. Las termoresistencias y termistores son mas lentas pero mas precisas. A mas amplio rango de medición mayor universalidad de las aplicaciones.

La elección del termopar tipo J para este análisis fue considerando primero la eliminación del tipo de sonda que no se adecua a nuestro rango de medición y al costo. De acuerdo ai diagrama adjunto muestra el rango de los diferentes sensores de temperatura. De lo anterior se eligió el termopar tipo J.

Especificaciones de exactitud

Sensor	Rango de temperatura °C	Clase	Valor fijo	Referido a temperatura
Termopar Tipo J	-40° a +750°C	1	±1.5 °C	± 0.004 x tli
Termopar Tipo T	-40° a +350°C	1	±0.5 °C	± 0.001 x tli
Termopar Tipo K	-40 a + 1000 °C	1	± 1.5 °C	± 0.004 x tli
NTC Estándar	- 25 a 74.9°C +75 a +150 °C	-	± 0.2°C ±0.5 % del valor medido	

4.4.5.- Dinamómetro.

Dinamómetro marca Eaton base sensor modelo 1805-5K, Medición de velocidad por sensor magnético, rueda de 60 pulsos y taquímetro digital con display de 5 dígitos .lectura máxima 9999 rpm con error de ± 1. Medición de torque con sensor tipo celda de carga e indicador digital con display de 3 ½ dígitos y control grueso y fino , de cero y de ganancia. Precisión de lectura de ± 1 %

4.4.6.- Analizador de Potencia Eléctrica Marca Dranetz modelo 808.

La serie Dranetz 808 es un equipo de medición universal para medición, guardado y supervisión de parámetros eléctricos. Existe en modelo de panel y portátil. Alta precisión.

La medición es hecha en sistemas de 1 y 3 fases. Una de sus características sobresalientes es su alta precisión y la medición de armónicas tanto en corriente como en voltaje en cada uno de los conductores, Para poder tener todas sus características se requerirían por lo menos 13 medidores independientes, Amperímetros, Voltímetros, Medidor de potencia (kW, kVA, kvar, cos-phi)

El sistema electrónico trifásico mide y digitaliza los valores efectivos tanto en voltaje como en corriente. Dos pruebas aleatorias son hechas cada segundo. De estos valores el microprocesador calcula las cantidades eléctricas Los valores instantáneos, máximos, mínimos y promedios junto con demás datos como fecha y hora son guardados en memoria la cual puede ser transmitida a un computador a traves del puerto RS232 o RS485 (opcional). Puede guardar 80,000 o 320,00 medidas

4.4.7.- Báscula.-

Báscula Rostek electrónica RTM plataforma con 4 celdas electrónicas de carga. Plataforma 60 x 70 cms, capacidad hasta 500 kilogramos.

Anexo II.- Presión de Saturación Ps del vapor de agua a diversas Temperaturas ts

Ts (°C)	Ps (bar)						
0.00	0.006108	26	0.03360	52	0.13613	79	0.4547
0.01	0.006112	27	0.03564	53	0.14293	80	0.4736
1	0.006566	28	0.03778	54	0.15002	81	0.4931
2	0.007055	29	0.04004	55	0.15741	82	0.5133
3	0.007575	30	0.04241	56	0.16511	83	0.5342
4	0.008129	31	0.04491	57	0.17313	84	0.5557
5	0.008718	32	0.04753	58	0.18147	85	0.5780
6	0.009345	33	0.05029	59	0.19016	86	0.6011
7	0.010012	34	0.05318	60	0.19920	87	0.6249
8	0.010720	35	0.05622	61	0.2086	88	0.6495
9	0.011472	36	0.05940	62	0.2184	89	0.6749
10	0.012270	37	0.06274	63	0.2286	90	0.7011
11	0.013116	38	0.06624	64	0.2391	91	0.7281
12	0.014014	39	0.06991	65	0.2501	92	0.7561
13	0.014965	40	0.07375	66	0.2615	93	0.7849
14	0.015973	41	0.07777	67	0.2733	94	0.8146
15	0.017039	42	0.08198	68	0.2856	95	0.8453
16	0.018168	43	0.08639	69	0.2984	96	0.8769
17	0.019362	44	0.09100	70	0.3116	97	0.9094
18	0.02062	45	0.09582	71	0.3253	98	0.9430
19	0.02196	46	0.10086	72	0.3396	99	0.9776
20	0.02337	47	0.10612	73	0.3543	100	1.0133
21	0.02485	48	0.11162	74	0.3696	101	1.0500
22	0.02642	49	0.11736	75	0.3855	102	1.0878
23	0.02808	50	0.12335	76	0.4019	103	1.1267
24	0.02982	50	0.12335	77	0.4189	104	1.1668
25	0.03166	51	0.12961	78	0.4365	105	1.2080

FALLA DE CARGA