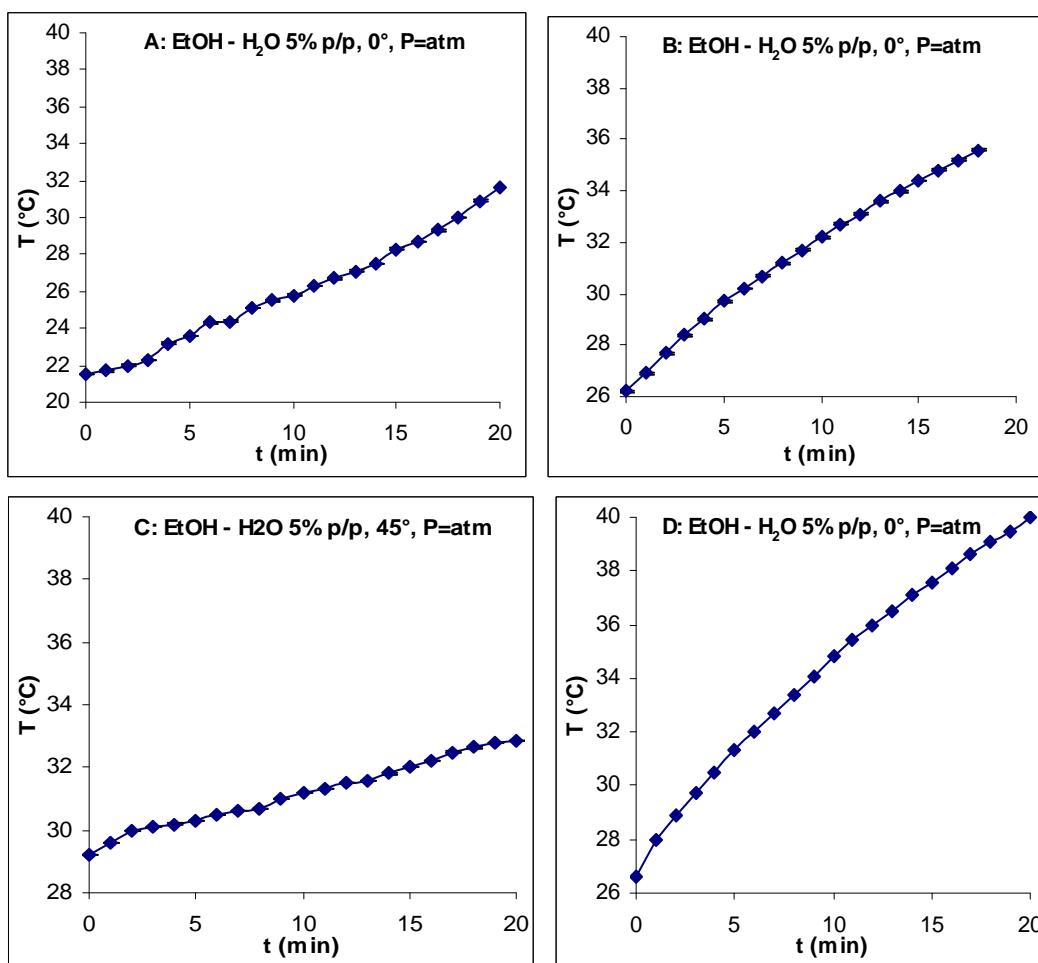


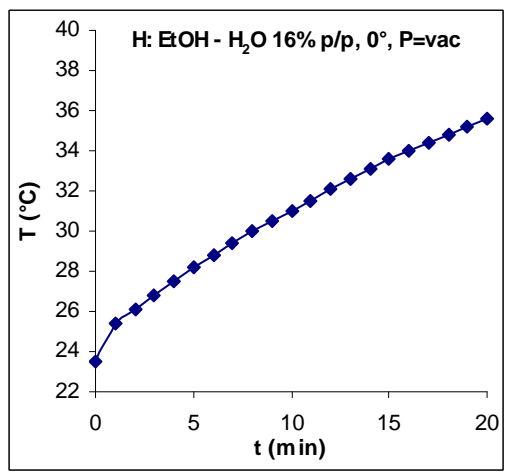
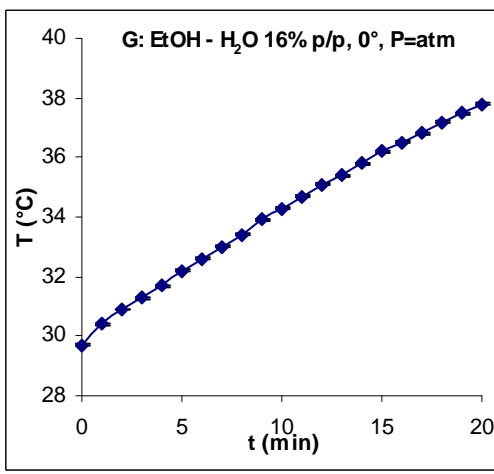
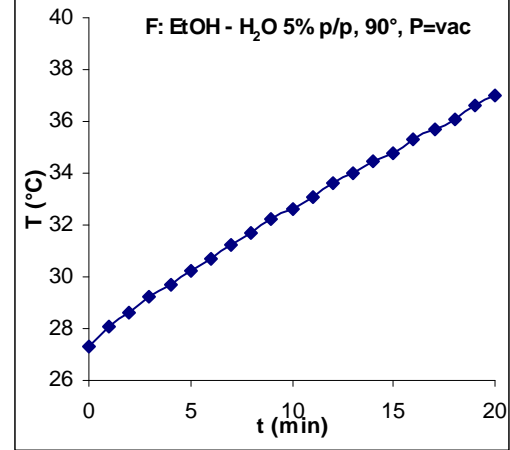
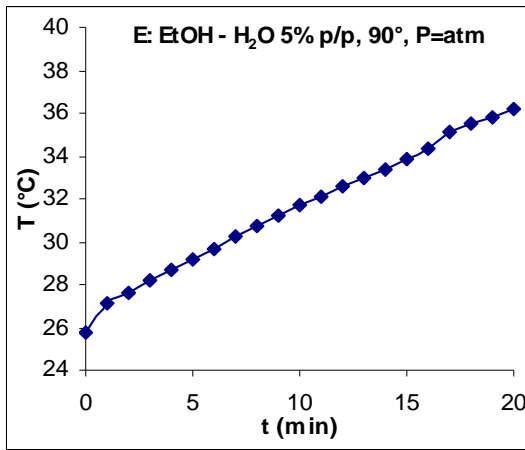
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

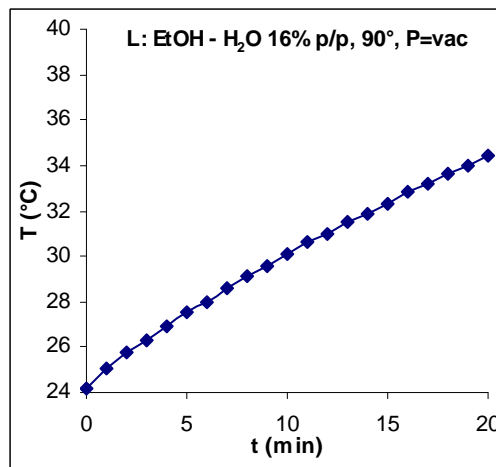
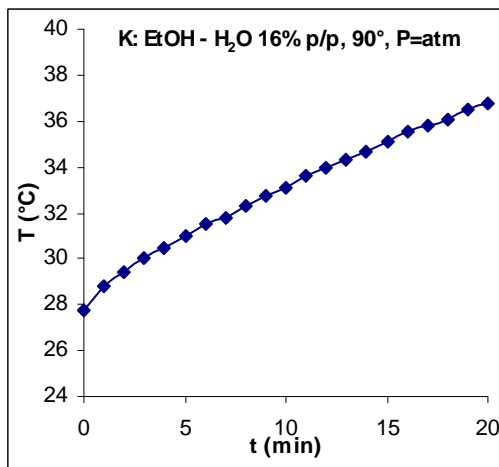
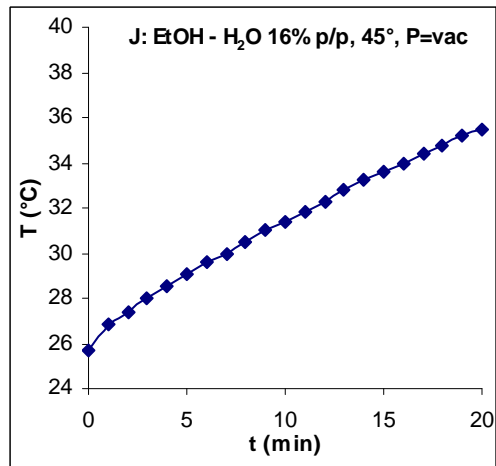
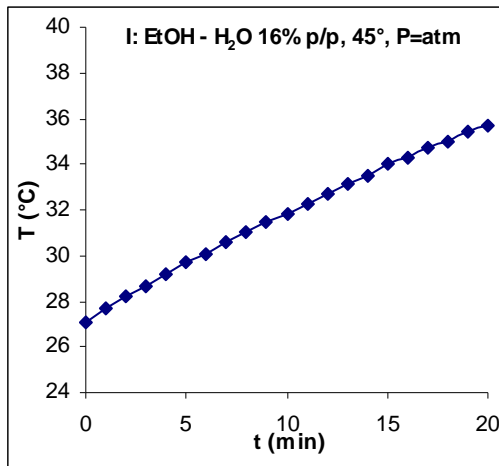
El comportamiento de la temperatura del tanque #2 con respecto al tiempo se registra en una hoja de cálculo, esto se realiza para cada uno de los 42 experimentos.

Los datos de T vs. t se muestran a continuación.

5.1 Resultados de la fase experimental 1: tubo de calor sin estructura capilar







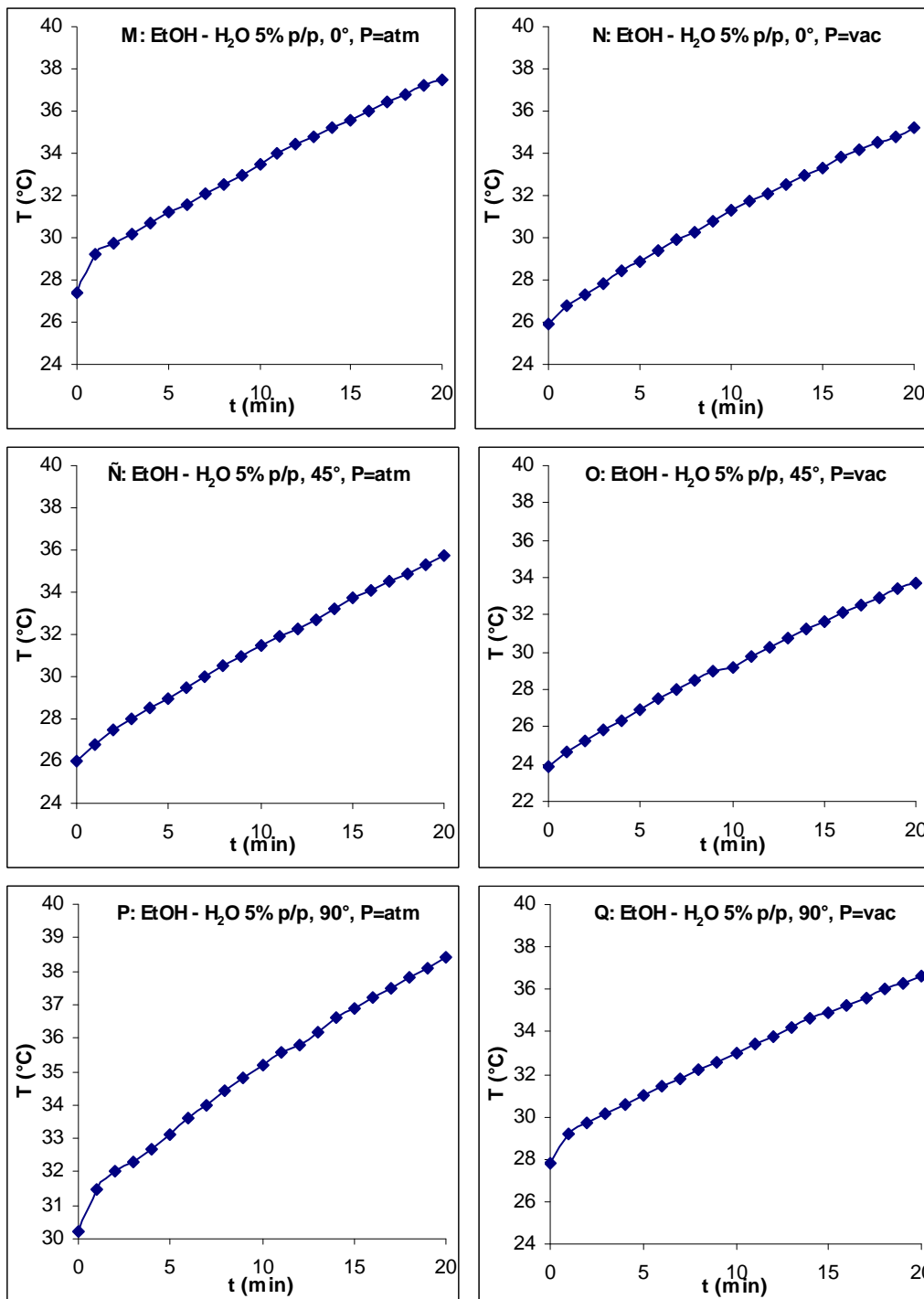
Al calcular el flux de calor radial ϕ mediante el método descrito en la sección 4.3, se obtienen los siguientes fluxes de calor axial máximos y promedio para la fase de experimentación sin estructura capilar:

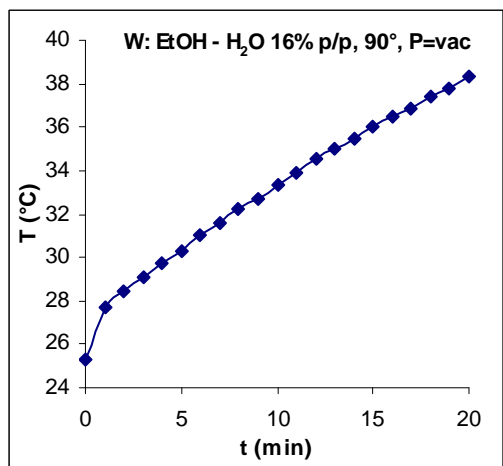
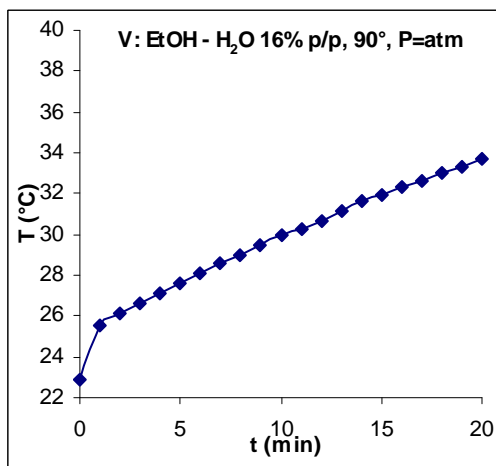
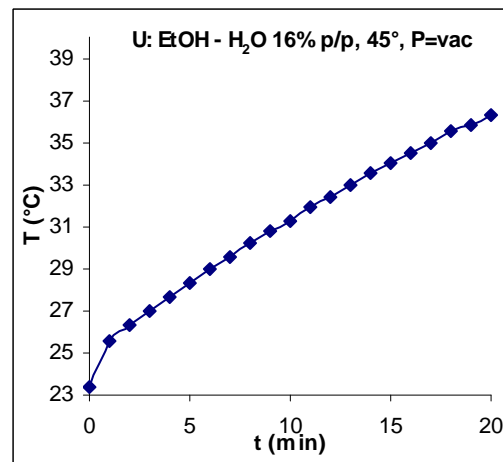
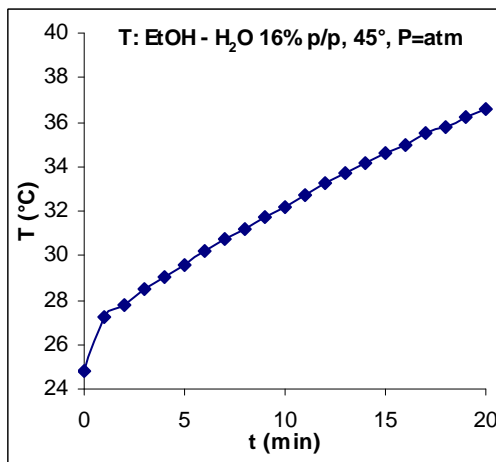
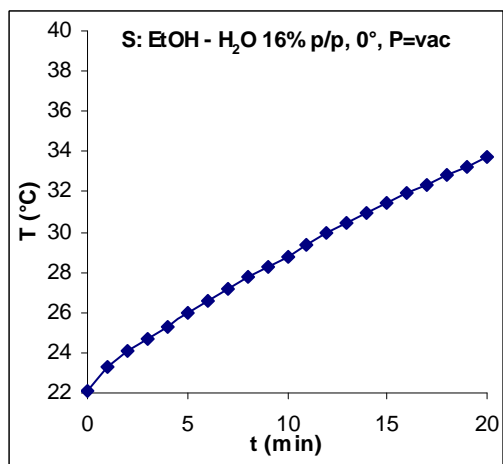
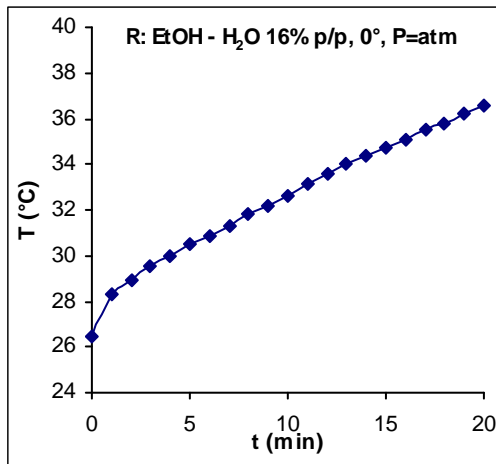
Experimento	Φ_{prom}	Φ_{max}
A	0.6408	1.1421
B	0.6545	1.0152
C	0.2310	0.5076
D	0.7149	1.7766
E	0.5710	1.6497
F	0.5846	1.0152
G	0.4653	0.8883
H	0.6641	2.4111
I	0.4907	0.7614
J	0.5499	1.3959
K	0.4991	1.2690
L	0.5795	1.1421

Tabla 1. Resultados experimentales F1.

Como puede observarse, el experimento D presenta el flux de calor radial promedio más elevado, mientras que el experimento H presenta el mayor valor de flux de calor radial máximo.

5.2 Resultados de la fase experimental 2: tubo de calor con estructura capilar





Posteriormente se calculan los fluxes radiales de calor ϕ en sus valores máximos y promedio, y se obtienen los siguientes resultados:

Experimento	Φ_{prom}	Φ_{max}
M	0.5689	2.2842
N	0.5901	1.1421
Ñ	0.6155	1.0152
O	0.6218	1.0152
P	0.4713	1.6497
Q	0.5584	1.7766
R	0.6408	2.2842
S	0.7360	1.5228
T	0.7487	3.0456
U	0.8185	2.7918
V	0.6853	3.2994
W	0.8248	3.0456

Tabla 2. Resultados experimentales F2.

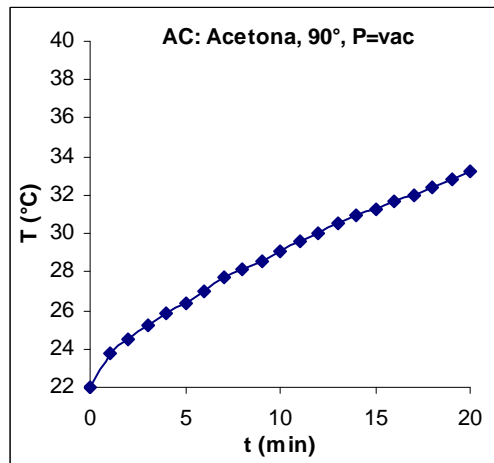
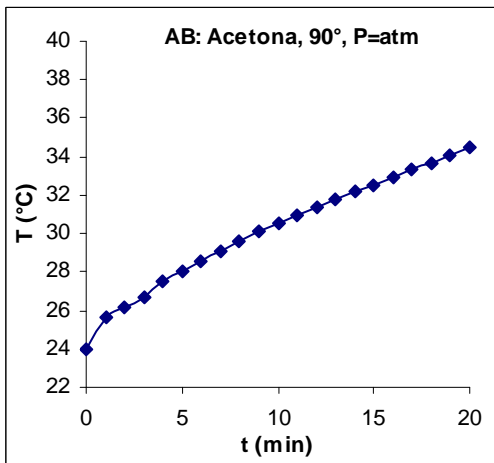
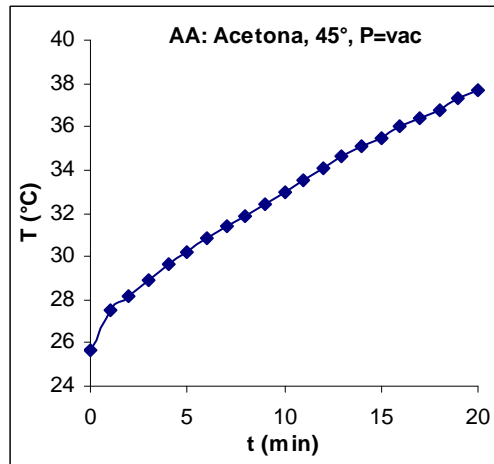
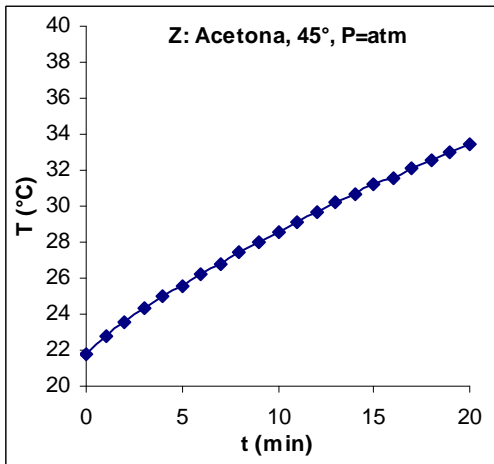
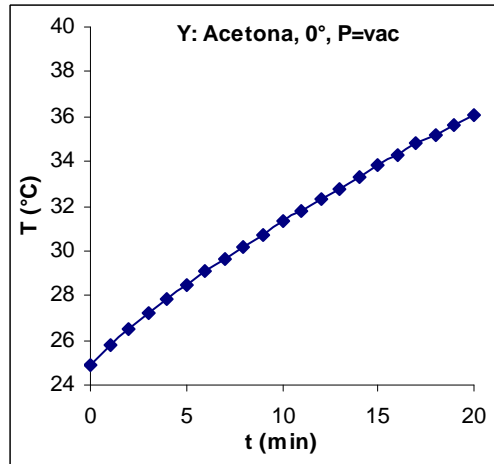
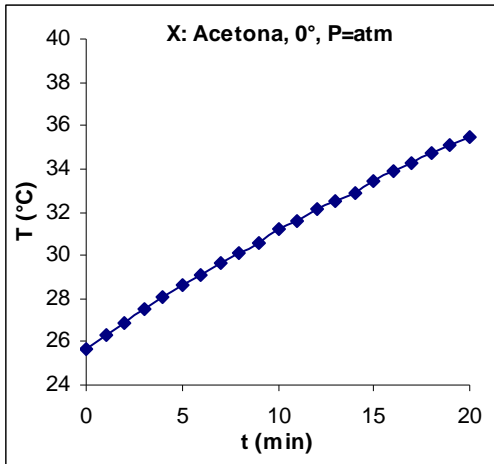
Al observar los resultados obtenidos es evidente que el experimento V presenta el mayor valor para el flux de calor radial máximo, y que el experimento W presenta el valor más elevado para el flux de calor radial promedio. Al efectuar la comparación entre los valores obtenidos para el flux de calor radial en ambas fases experimentales, se observa que la adición del elemento capilar incrementa sensiblemente el flux de calor radial. El incremento promedio en el flux de calor radial se muestra en la siguiente tabla.

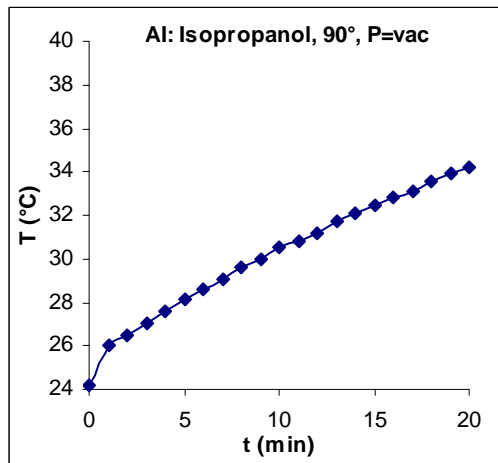
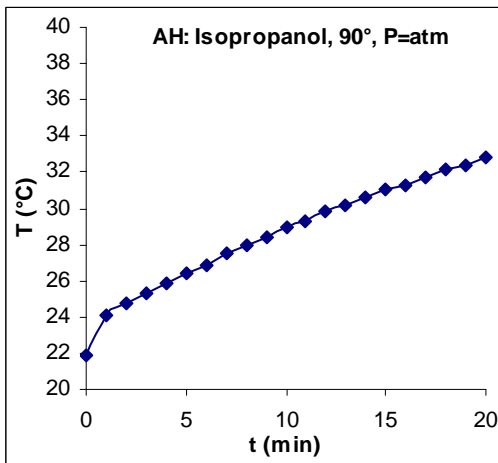
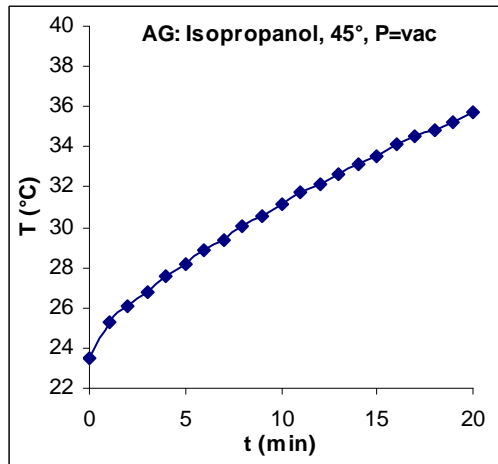
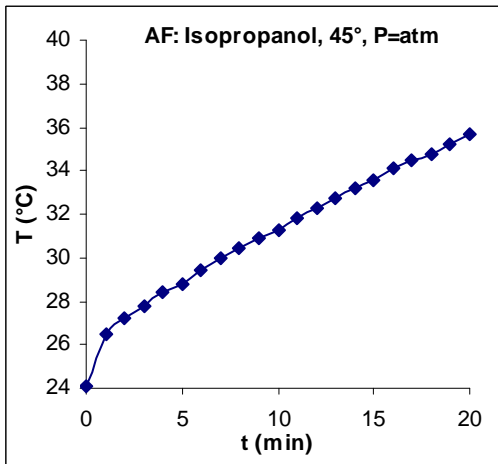
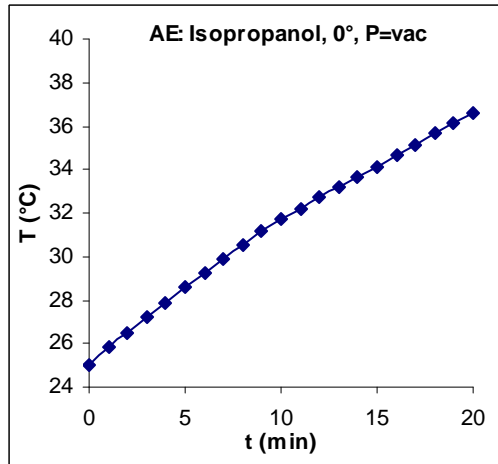
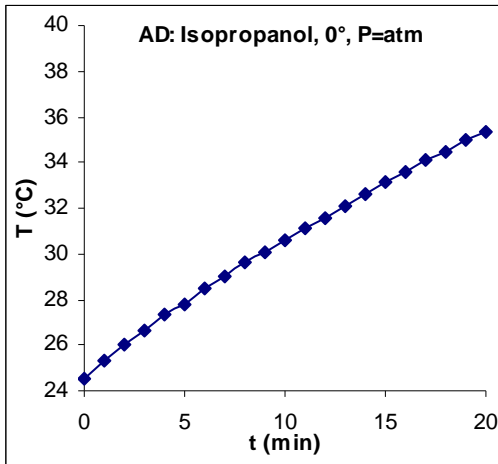
Incremento promedio (%)	
Φ_{prom}	Φ_{max}
18.58	66.10

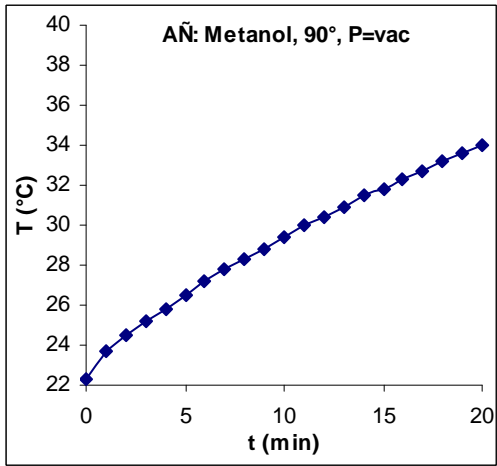
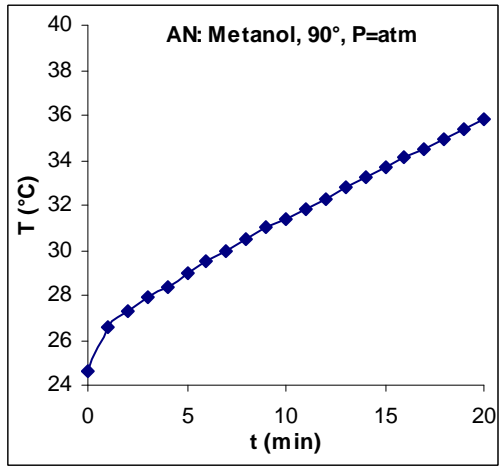
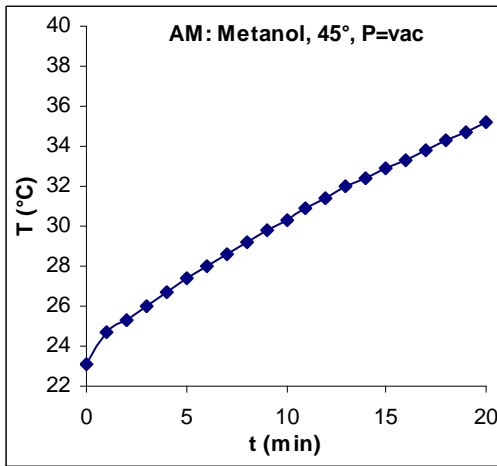
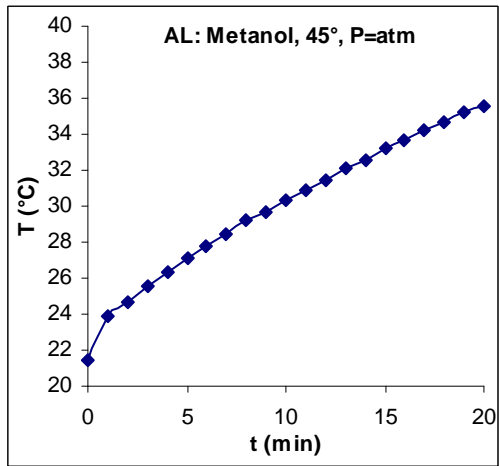
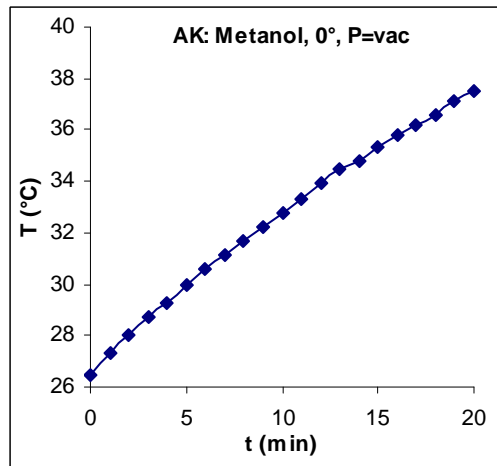
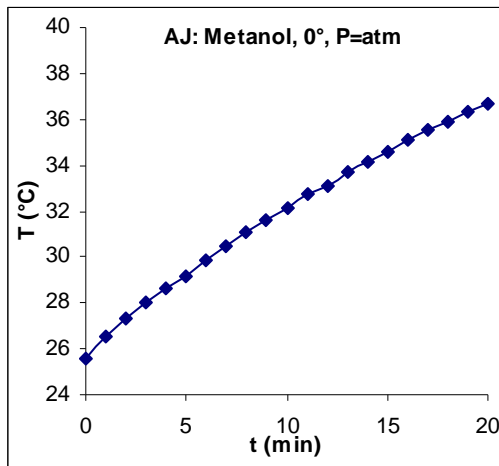
Tabla 3. Incremento promedio del flux radial de calor

5.3 Resultados de la fase experimental 3: experimentación con fluidos de trabajo comunes

Después de evaluar el efecto de la estructura capilar con las mezclas etanol-agua, se experimenta con fluidos de trabajo comunes que reporta la literatura. Los resultados son los siguientes:







Con los datos obtenidos se calculan los fluxes de calor radiales, y se obtienen los siguientes resultados:

Experimento	Φ_{prom}	Φ_{max}
X	0.6218	0.7614
Y	0.7106	1.1421
Z	0.7424	1.2690
AA	0.7614	2.2842
AB	0.6662	2.0304
AC	0.7106	2.2842
AD	0.6853	1.0152
AE	0.7360	1.0152
AF	0.7360	3.0456
AG	0.7741	2.2842
AH	0.6916	2.7918
AI	0.6345	2.2842
AJ	0.7043	1.1421
AK	0.6979	1.0152
AL	0.8946	3.0456
AM	0.7677	2.0304
AN	0.7106	2.5380
AÑ	0.7424	1.7766

Tabla 4. Resultados experimentales F3.

Se observa claramente que el experimento AL presenta los valores más altos para ambos fluxes radiales (promedio y máximo).

5.4 Análisis de los resultados experimentales

El objetivo de la primera y segunda fase de experimentación es determinar el efecto que tiene la adición de una estructura capilar al tubo de calor, así como la magnitud de este efecto. Al analizar los resultados obtenidos, se concluye que la adición de la estructura capilar aumenta el flux de calor radial de manera significativa. Se obtuvo el promedio de todos los valores para el flux de calor radial con la estructura y sin la estructura; y obteniendo el porcentaje de cambio en el flux radial. Como resultado se aprecia que el porcentaje de cambio es positivo (el valor se incrementa) para los dos tipos de flux de calor radial medidos. Entonces, para el caso de las mezclas etanol-agua, la adición de una estructura capilar en el interior del tubo de calor mejora la capacidad de transferencia de calor del tubo. El objetivo de la tercera fase es determinar los fluxes de calor radiales para un conjunto de fluidos de trabajo, probando las mismas condiciones

de ángulo de inclinación α y presión en el interior del tubo. Los resultados de esta etapa muestran que los valores más altos de flux de calor promedio se obtienen utilizando metanol como fluido de trabajo, mientras que para el flux máximo los fluidos con los que se observa el mayor flux máximo son el metanol y el isopropanol. Con el fin de facilitar la comparación de las capacidades de transferencia de calor para todos los experimentos, se construye una gráfica que muestra los fluxes radiales para todas las corridas experimentales.

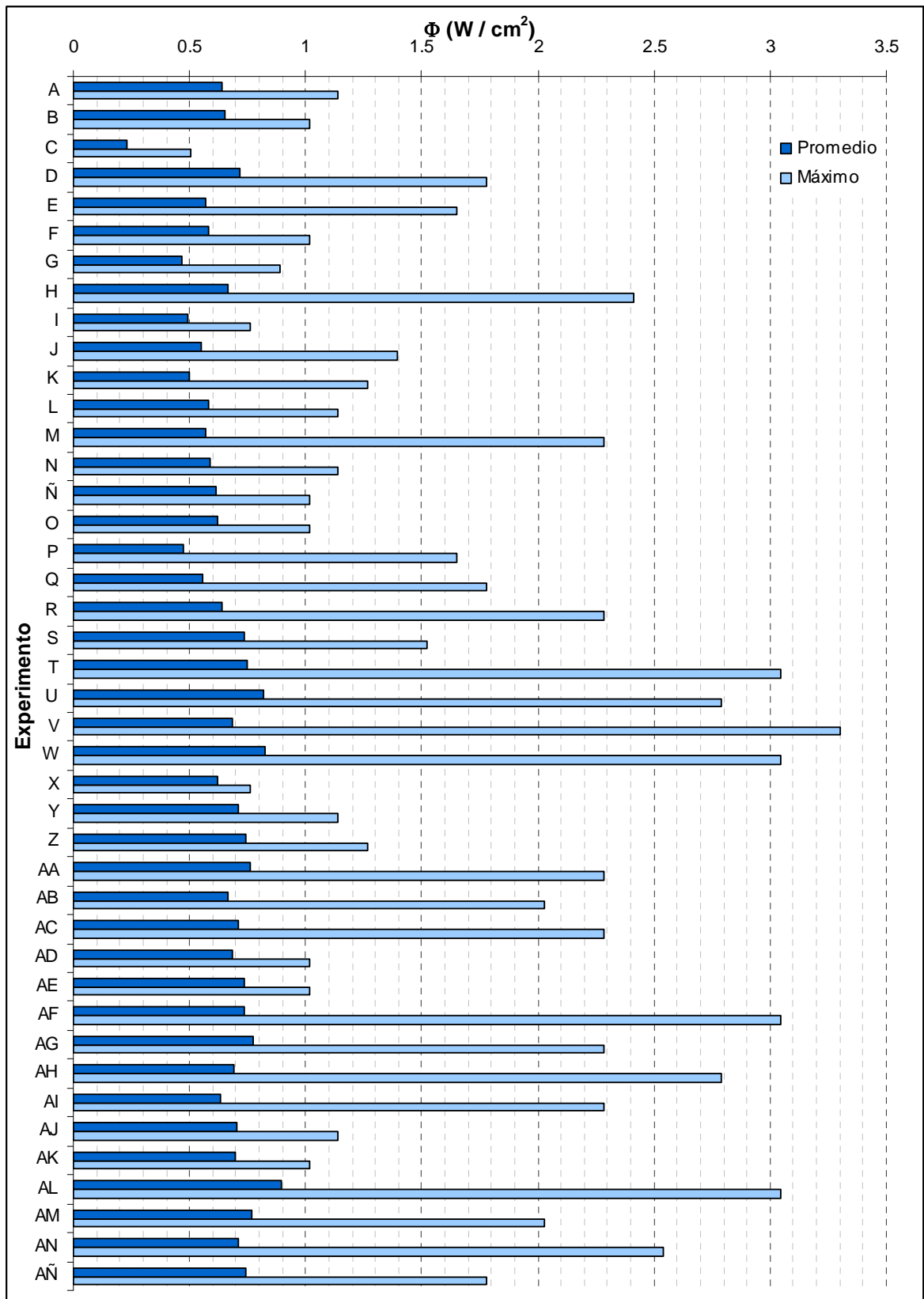


Figura 1. Comparativo entre resultados experimentales.

Al analizar la gráfica anterior se pone en evidencia que los experimentos T, V, W, AF y AL son los que presentan una mayor capacidad de transferencia de calor. Es

necesario entonces discutir los factores que intervienen en el desempeño de estos experimentos, para determinar su efecto.

5.5 Discusión de los resultados experimentales

De acuerdo con los datos experimentales, puede concluirse que la adición de la estructura capilar mejora la capacidad de transferencia de calor. Para validar de manera estadística el efecto del capilar en los valores obtenidos para el flux de calor radial, se ejecuta un análisis de varianza (ANOVA) (Apéndice 2). Se toman como grupos de prueba los conjuntos de datos con la estructura capilar y sin la misma. Al ejecutar la prueba, se obtiene que la hipótesis nula se rechaza ($F_{\text{calc}} > F_{\text{crit}}$), lo que nos indica que existe significancia en la prueba. Esto señala que alguno de los grupos presenta un factor que ocasiona una diferencia significativa entre los valores obtenidos, lo que confirma el efecto de la estructura capilar.

Uno de los factores determinantes en la capacidad de transferencia de calor de un tubo de calor es el fluido de trabajo. En la sección 2.3 se menciona al *parámetro de transporte de calor* de un fluido de trabajo (Ecuación 8). Por medio de este parámetro es posible estimar el desempeño que un fluido de trabajo tendrá en su aplicación en un tubo de calor. Para fines de comparación, se calculan los parámetros de transferencia de calor P_{ht} para todos los fluidos utilizados, a partir de los datos reportados en la siguiente tabla.

Fluido	ρ_l (kg/m ³)	σ (N/m)	κ (J/kg)	μ_l (N s/m ²)	P_{ht}
Etanol-Agua 5%	987.04	0.0728	2,187,000	0.00137	1.15E+11
Etanol-Agua 16%	962.85	0.0703	2,030,800	0.00217	6.34E+10
Acetona	792.00	0.0228	987,000	0.00331	5.38E+09
Isopropanol	785.00	0.0230	664,000	0.00177	6.77E+09
Metanol	791.00	0.0793	1,120,000	0.00593	1.18E+10

Tabla 5. Propiedades físicas de los fluidos y P_{ht} calculado.

Los resultados se muestran en la siguiente gráfica comparativa

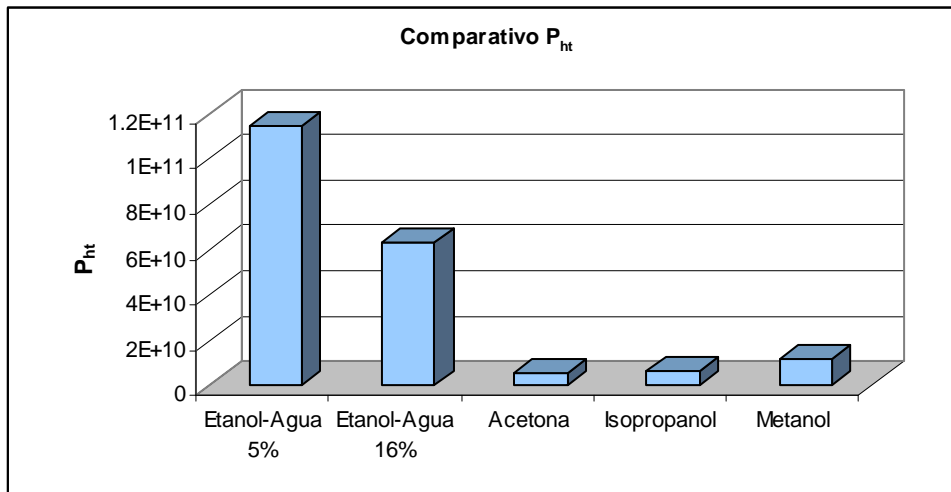


Figura 2. Comparativo P_{ht}

Es evidente que las mezclas etanol-agua son los fluidos con un parámetro P_{ht} mayor. Esto es un indicio de que las mezclas etanol-agua tienen potencial para usarse como fluidos de trabajo en tubos de calor. El metanol está por debajo de las mezclas etanol-agua, le sigue el isopropanol y por último la acetona. Al comparar los resultados obtenidos con el parámetro de transporte de calor para las mezclas etanol-agua, se detecta que existe una mayor transferencia de calor experimental para la mezcla al 16%, aunque el valor de su parámetro de transporte de calor sea menor. En el caso de los fluidos comunes (acetona, isopropanol, metanol) la correlación del flux radial de transferencia de calor con el parámetro P_{ht} es buena, ya que las magnitudes de ambos son mayores para el metanol, seguido del isopropanol y de la acetona, la cual posee el mínimo valor para ambos. En el caso de las soluciones etanol-agua, es posible que la correlación entre el parámetro de transporte de calor y el flux de calor radial promedio no sea correcta debido a que se trata de una solución y no de una sustancia pura. Las propiedades necesarias para calcular el valor del parámetro de transferencia de calor no se encuentran reportadas en la literatura y es necesario obtenerlas mediante correlaciones y el uso del simulador AspenOne©. Es posible que, debido a la singularidad

observada por Reynoso (2005) en el comportamiento del ángulo de contacto en composiciones cercanas al 16% (p/p) en la mezcla etanol-agua, los valores predichos por el modelo matemático del simulador antes mencionado no tomen en cuenta las interacciones necesarias para poder predecir la singularidad en la mezcla, generando un valor muy distinto al observado experimentalmente para la mezcla al 16%. Las densidades y tensiones superficiales para ambas soluciones etanol-agua se obtuvieron mediante la herramienta “property analysis” del software antes mencionado. A partir de datos experimentales [11], se obtuvo la viscosidad para ambas soluciones etanol-agua, mediante el uso de una línea de tendencia y su ecuación. Esta se muestra en la figura 15.

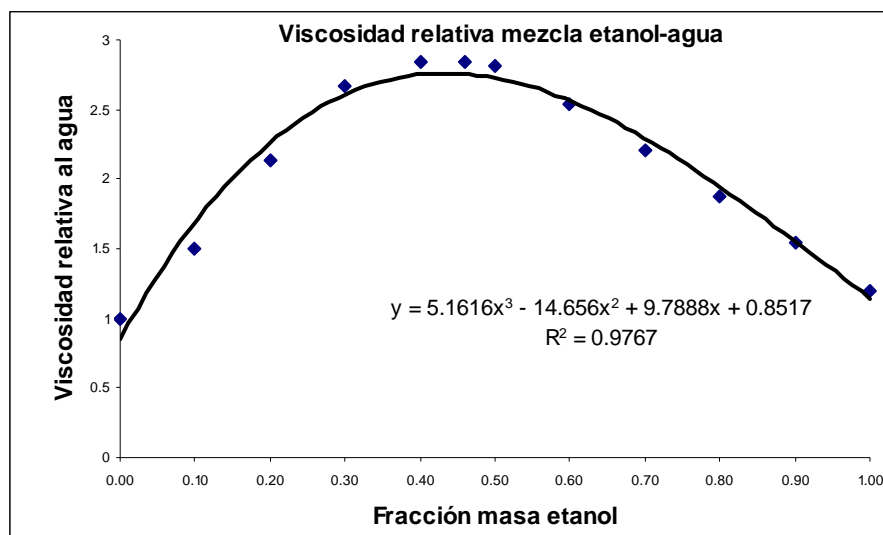


Figura 3. Datos experimentales reportados y línea de tendencia ajustada para la viscosidad de la mezcla etanol-agua.

Para el caso del calor latente de vaporización κ , no es posible hallar datos experimentales reportados, ni alguna correlación empírica para las mezclas etanol-agua. Debido a esto, se decidió que el calor latente de vaporización κ se calcularía mediante una suma ponderada con las fracciones masa de los calores latentes de vaporización

para las especies puras. Es posible que debido a la ausencia de datos experimentales reportados, el valor del parámetro de transporte de calor calculado para las mezclas etanol-agua no sea muy cercano al real. Cabe destacar que la literatura no menciona el uso del parámetro de transporte de calor en sustancias no puras.

En cuanto al efecto del ángulo de inclinación, se observa que el mayor flux de calor radial (experimento V) se obtiene en un ángulo α de 90° , seguido por el experimento W con ángulo de 90° . Los experimentos T, AF y AL presentan el mismo valor para el flux de calor radial que el experimento W, pero con un ángulo de 45° . Esto indica que un ángulo mayor a 0° es recomendable para incrementar el flux de calor radial del tubo de calor estudiado. Sin embargo, el análisis de varianza ANOVA no rechaza la hipótesis nula. Esto puede deberse a que los valores promedio de los fluxes no difieren considerablemente y a que, debido a la resolución utilizada para la medición de la temperatura (0.1°C), los valores para los fluxes de calor radial son idénticos en algunos experimentos. Una mayor resolución para la lectura de temperatura generaría una mayor diversidad en los fluxes calculados. Sin embargo, el trabajo experimental refuerza la noción de Reay (1979) de que ángulos cercanos a 90° producen un incremento en la capacidad de transferencia de calor en estos dispositivos.

La presión interna a la que se comienza la operación del tubo de calor es analizada de igual forma por un análisis de varianza ANOVA, y la prueba indica que no existe una influencia significativa sobre la diferencia de las medias de los datos experimentales. Al analizar los datos experimentales, se encuentra que la mayoría de los experimentos con mayor tasa de transferencia de calor por unidad de área se efectuaron a presión atmosférica. El experimento W es el único efectuado con presión de vacío (-50 kPa). El bajo desempeño de los experimentos efectuados a presiones de vacío puede deberse a que la temperatura a la cual el fluido se evapora es demasiado baja, lo que ocasiona una

diferencia de temperatura muy pequeña entre el fluido a condensarse y el agua que recibe el calor de vaporización del fluido. Esto podría ocasionar que el fluido en fase vapor no se condense por completo, y exista una cantidad muy pequeña de líquido en el evaporador, la cual disminuiría poco a poco hasta que el evaporador se secase. En este caso, sólo se transferiría calor por medio del calor sensible del vapor, que se encontraría muy por encima de su punto de ebullición. Es importante señalar que los coeficientes convectivos de transferencia de calor en cambio de fase (en este caso, el coeficiente de transferencia de calor por condensación) son varias veces mayores a los coeficientes convectivos de una especie gaseosa en fase homogénea (Peters, 2004). Otra posible causa para la deficiente operación podría ser la generación excesiva de vapor en el evaporador, lo que ocasionaría un flujo de vapor elevado a través del área de sección transversal, posiblemente alcanzando el límite sónico. Para los fluidos estudiados en este trabajo se obtuvo el mejor desempeño operando a presión atmosférica.