



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación :

INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL MECÁNICO

Título del proyecto:

FUNCIONAMIENTO DE UN TERMOSIFÓN CILÍNDRICO
CON DISTINTOS FLUIDOS DE TRABAJO

Manuel José Arcís Tellería

Tutor: Juan José Aguas Alcalde

Pamplona, 29 de Junio de 2010

Todo mi agradecimiento a Juan José Aguas,
por la dedicación y paciencia depositadas en
este proyecto.



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación :

INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL MECÁNICO

Título del proyecto:

FUNCIONAMIENTO DE UN TERMOSIFÓN CILÍNDRICO
CON DISTINTOS FLUIDOS DE TRABAJO

MEMORIA

Manuel José Arcís Tellería

Tutor: Juan José Aguas Alcalde

Pamplona, 29 de Junio de 2010

Índice

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	NOCIÓN DE TERMOSIFÓN Y DE TUBO DE CALOR.....	1
1.1.1	Partes que componen un tubo de calor.....	2
1.2	ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL.....	4
1.3	APROXIMACIÓN A LA FÍSICA.....	6
1.3.1	Los principios físicos que gobiernan el funcionamiento de los tubos de calor.....	6
1.3.2	Límites de funcionamiento de los tubos de calor y los termosifones.....	8
1.4	PROPIEDADES DE LOS TUBOS DE CALOR Y LOS TERMOSIFONES.....	10
1.5	TIPOS DE TUBOS DE CALOR.....	12
1.5.1	Termosifón bifásico.....	12
1.5.2	Tubo de calor impulsado por capilaridad.....	12
1.5.3	Tubo de calor anular.....	13
1.5.4	Tubo de calor plano.....	13
1.5.5	Tubo de calor giratorio.....	14
1.5.6	Tubo de calor de borde de ataque.....	14
1.5.7	Tubo de calor cargado con gas.....	14
1.5.8	Tubo de calor de lazo.....	15
1.5.9	Tubo de calor de arteria.....	17
1.6	APLICACIONES DE LOS TUBOS DE CALOR.....	17
1.6.1	Aplicaciones aeroespaciales.....	17
1.6.2	Intercambiadores de calor.....	17
1.6.3	Refrigeración de equipamiento eléctrico y electrónico.....	18
1.6.4	Hornos.....	18
1.6.5	Producción.....	19
1.6.6	Medicina y control de la temperatura del cuerpo humano.....	19
1.6.7	Sistemas de transporte y deshielo.....	19
1.6.8	Motores y la industria de la automoción.....	20
1.6.9	Permafrost.....	21
1.6.10	Energía solar.....	21
1.6.11	Fabricación.....	21
2	OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	23
2.1	OBJETIVOS FUNDAMENTALES.....	23
2.2	OBJETIVOS SECUNDARIOS.....	24

3	ESTUDIO DE LAS SUSTANCIAS A ENSAYAR.....	25
3.1	CARACTERÍSTICAS DE LAS SUSTANCIAS A ENSAYAR.....	25
3.2	PROPIEDADES TERMODINÁMICAS Y TERMO-FÍSICAS DE LAS SUSTANCIAS A ENSAYAR.....	26
3.3	SUSTANCIAS SELECCIONADAS.....	26
3.3.1	Mezclas azeotrópicas.....	27
3.3.2	Presentación de las sustancias ensayadas.....	27
4	ENSAYOS CON EL TERMOSIFÓN CILÍNDRICO.....	29
4.1	MONTAJE EXPERIMENTAL.....	29
4.1.1	Componentes del montaje experimental.....	30
4.2	TOMA DE MEDIDAS.....	34
4.2.1	Medida de temperatura.....	34
4.2.2	Medida de tensión e intensidad.....	36
4.2.3	Medida de presión.....	37
4.3	MÉTODO EXPERIMENTAL.....	38
4.3.1	Condiciones de trabajo.....	39
4.4	ENSAYOS REALIZADOS. CARGAS DE FLUIDO DE TRABAJO.....	40
5	ENSAYOS CON EL TERMOSIFÓN PRISMÁTICO.....	44
5.1	SUSTANCIAS ENSAYADAS.....	44
5.2	DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO.....	44
5.2.1	Dimensiones, características y acoplamientos.....	46
5.2.2	Colocación de las sondas.....	47
5.3	MÉTODO EXPERIMENTAL.....	48
5.3.1	Equipo de trabajo.....	48
5.3.2	Conexiones eléctricas.....	49
5.3.3	Procedimiento de ensayo.....	50
6	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS CON EL TERMOSIFÓN CILÍNDRICO.....	51
6.1	RESULTADO DE UN ENSAYO.....	51
6.2	RESISTENCIAS TÉRMICAS E ISOTERMICIDAD.....	53
6.3	COMPORTAMIENTO DEL TERMOSIFÓN SEGÚN LA TEMPERATURA DE LA CÁMARA CLIMÁTICA Y LA CARGA DE FLUIDO.....	54
6.3.1	Fluido de trabajo Acetona.....	55
6.3.2	Fluido de trabajo mezcla Acetona-NPentano.....	59
6.3.3	Fluido de trabajo Agua.....	63
6.3.4	Fluido de trabajo Ciclopentano.....	67
6.3.5	Fluido de trabajo mezcla Ciclopentano-Metanol.....	71

6.3.6	Fluido de trabajo Dietil Éter.....	75
6.3.7	Fluido de trabajo mezcla Dietil Éter-Formiato de Metilo.....	79
6.3.8	Fluido de trabajo FC-84.....	83
6.3.9	Fluido de trabajo Formiato de Metilo.....	87
6.3.10	Fluido de trabajo Isopentano.....	90
6.3.11	Fluido de trabajo Metanol.....	94
6.3.12	Fluido de trabajo N-Hexano.....	98
6.3.13	Fluido de trabajo N-Pentano.....	102
6.3.14	Fluido de trabajo R-141b.....	106
6.3.15	Fluido de trabajo R-365-mfc.....	110
6.4	COMPORTAMIENTO DEL TERMOSIFÓN SEGÚN LA TEMPERATURA DE LA CÁMARA CLIMÁTICA Y EL FLUIDO DE TRABAJO.....	114
6.4.1	Bloque de ensayos al 50%.....	115
6.4.2	Bloque de ensayos al 70%.....	119
6.4.3	Bloque de ensayos al 90%.....	123
6.5	DIFERENCIAS DE COMPORTAMIENTO SEGÚN OTRAS VARIABLES.....	127
6.5.1	Flujo de calor entrante.....	127
6.5.2	Orientación del termosifón.....	136
7	OTRAS CONSIDERACIONES.....	144
7.1	REPETITIVIDAD.....	144
7.2	COMPORTAMIENTO DEL TERMOSIFÓN SEGÚN LA PRESIÓN EN SU INTERIOR Y EL FLUIDO DE TRABAJO.....	147
7.3	CLASIFICACIÓN DE TODOS LOS ENSAYOS.....	160
7.3.1	Clasificación de los ensayos a diferentes flujos de calor.....	167
7.3.2	Clasificación de los ensayos con diferentes inclinaciones.....	168
7.4	COMPORTAMIENTO DEL TERMOSIFÓN SEGÚN ALGUNAS PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS DE TRABAJO.....	169
7.4.1	Entalpía molar de vaporización.....	170
7.4.2	Entalpía másica de vaporización.....	172
7.4.3	Densidad del líquido.....	174
7.4.4	Calor específico del líquido.....	176
7.4.5	Masa molecular.....	178
8	COMPARACIÓN ENTRE LOS TERMOSIFÓNES CILÍNDRICO Y PRISMÁTICO... ..	180
8.1	ENSAYOS SIN CONTROL DE POTENCIA (SCP).....	180
8.1.1	Comparación según la temperatura de la cámara climática y la carga.....	181
8.1.2	Comparación según la temperatura de la cámara climática y el fluido de trabajo.....	184

8.2	ENSAYOS CON CONTROL DE POTENCIA (CCP).....	188
8.2.1	Comparación según la temperatura de la cámara climática y la carga.....	188
8.2.2	Comparación según la temperatura de la cámara climática y el fluido de trabajo.....	190
8.3	COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS CON LOS TERMOSIFONES CILÍNDRICO Y PRISMÁTICO.....	192
8.3.1	Ensayos con el termosifón cilíndrico y con el termosifón prismático SCP.....	192
8.3.2	Ensayos termosifón cilíndrico y termosifón prismático CCP.....	195
9	CONCLUSIONES.....	196
9.1	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	196
9.2	CONCLUSIONES FINALES.....	201
10	BIBLIOGRAFÍA.....	202
10.1	LIBROS.....	202
10.2	ARTÍCULOS.....	202

1 INTRODUCCIÓN

El transporte de energía juega un papel crecientemente importante en muchas áreas de la tecnología moderna. Por ejemplo, en una planta de energía nuclear, la energía producida en forma de calor debe ser evacuada del núcleo del reactor antes de poder ser convertida en energía eléctrica útil. De forma similar, prácticamente todos los dispositivos eléctricos generan calor como subproducto no aprovechable, el cual debe ser transportado del entorno más próximo hacia un sumidero de calor adecuado.

No es de extrañar, por tanto, que se hayan realizado importantes esfuerzos para encontrar medios más eficientes de transporte de calor. El problema es que los metales, aun transportando el calor mejor que otros materiales, no son lo suficientemente buenos. El cobre, por ejemplo, es considerado como uno de los mejores conductores del calor. Sin embargo, si a un extremo de una barra sólida de cobre de 2,5 cm de diámetro y 30 cm de largo se le aplicara una potencia térmica de 10.000 vatios, la diferencia de temperatura a lo largo de la barra excedería los 16.500 °C (¡Un extremo se convertiría en un vapor más caliente que la superficie del Sol mientras que el otro extremo permanecería a la temperatura de la habitación!). Es singular por tanto que un dispositivo sea capaz de transferir esta cantidad de energía con una diferencia de temperatura de unos pocos grados. Este dispositivo es el llamado tubo de calor, capaz de ser varios miles de veces más eficaz en transportar calor que el mejor de los metales.

1.1 NOCIÓN DE TERMOSIFÓN Y DE TUBO DE CALOR

El tubo de calor es esencialmente un recipiente en vacío (evacuado el aire de su interior), cuyas paredes están revestidas con una estructura capilar, o porosa, la cual es saturada con un fluido volátil (Figura 1.1-1). El funcionamiento de un tubo de calor combina dos principios familiares de la física: la transferencia de calor de vapor y el efecto capilar. La transferencia de calor de vapor es la responsable de transportar la energía en forma de calor desde la sección del evaporador en un extremo del tubo hacia la sección del condensador en el otro extremo. Este principio es el mismo que el utilizado en los convencionales sistemas de calefacción por vapor. Lo que distingue al tubo de calor de estos sistemas es que el efecto capilar es el encargado de enviar de vuelta al fluido de trabajo condensado al evaporador, sin necesidad de una fuente de energía externa como una bomba (el efecto capilar es el proceso por el cual la humedad sube en una toalla de baño cuando un extremo es sumergido en agua).

El termosifón, que es el dispositivo objeto de estudio de este proyecto, es un tipo concreto de tubo de calor. A diferencia del tubo de calor explicado, no incorpora una estructura porosa por la cual retorna el fluido de trabajo condensado. En el termosifón, el fluido de trabajo condensado, después de haber cedido el calor, es devuelto a la sección de evaporación mediante la fuerza de la gravedad (Figura 1.1-2), formándose una película de fluido condensado que cae por las paredes interiores del recipiente, desde el condensador hasta el evaporador.

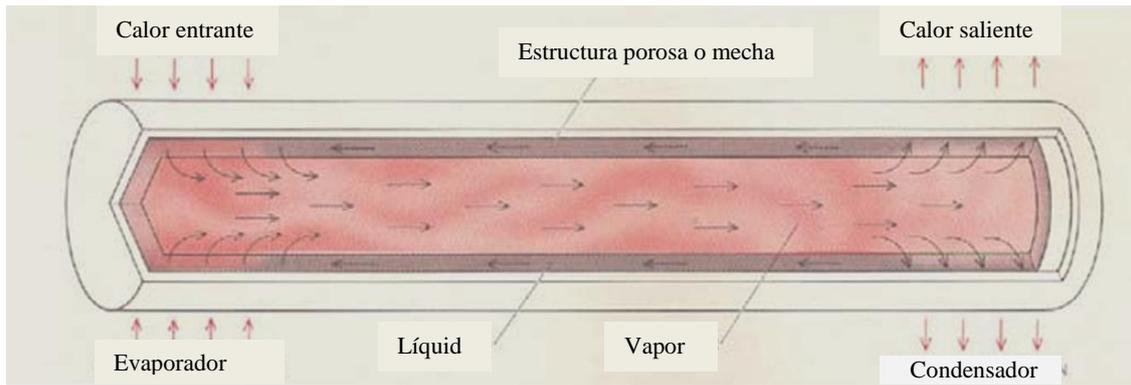


Figura 1.1-1 Sección de un típico tubo de calor cilíndrico. Muestra el sistema cíclico en el cual está basado el funcionamiento del dispositivo. La entrada de calor en un extremo del tubo causa la evaporación del fluido de trabajo desde la estructura porosa y también aumenta la presión de vapor en ese extremo. Como resultado el vapor se mueve por el centro del tubo hacia el extremo de salida del calor. Cuando el calor es evacuado desde el tubo, el vapor se condensa y vuelve por la estructura porosa. El condensado retorna hacia el extremo de entrada de calor por efecto capilar. Como el fluido se vaporiza y condensa prácticamente a la misma temperatura, la temperatura a lo largo del tubo tiende a ser uniforme.

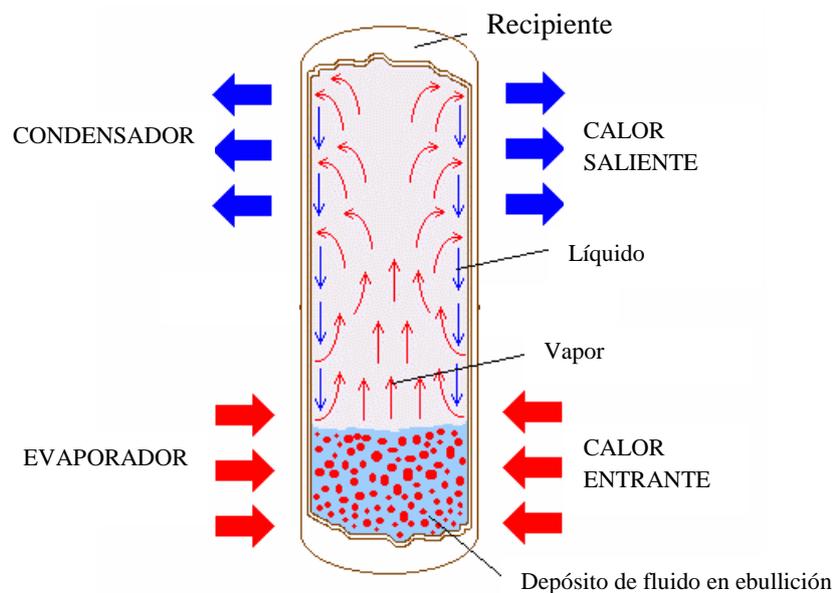


Figura 1.1-2 Sección de un termosifón cilíndrico. El fluido de trabajo condensado retorna al evaporador por gravedad. Esto hace que el evaporador tenga que estar siempre debajo del condensador. El fluido de trabajo se vaporiza en el depósito que se forma en el extremo inferior del tubo.

1.1.1 Partes que componen un tubo de calor

Básicamente, un tubo de calor se compone de tres partes: un recipiente, que puede estar construido de vidrio, cerámica o metal; una estructura absorbente o mecha, construida de tejido de fibra de vidrio, metal sinterizado, mallas de alambre o surcos; y un fluido de trabajo, el cual puede variar desde el nitrógeno o helio para tubos de calor de baja temperatura (criogénicos) a litio, potasio o sodio para tubos de calor de alta temperatura (metal líquido). Cada uno de estos tres componentes es igualmente importante y hay que considerar el tipo de material del que está compuesto, sus propiedades termo-físicas y la compatibilidad con los demás componentes. Por

ejemplo, el material del recipiente debe ser compatible con el fluido de trabajo y la mecha, tiene que ser lo suficientemente resistente como para soportar las presiones asociadas con las temperaturas de saturación que se alcanzan dentro del tubo en su funcionamiento normal, y debe tener una alta conductividad térmica.

La estructura porosa del tubo de calor tiene como función ser el vehículo a través del cual, y proporcionar el mecanismo por el cual, el fluido de trabajo es devuelto desde el condensador al evaporador (Figura 1.1-3). Con objeto de proporcionar un medio de poca resistencia al flujo por el cual el líquido pueda ser conducido hacia el evaporador, es necesaria una estructura porosa de gran permeabilidad. Pero, para incrementar la presión de bombeo capilar, es necesario un tamaño de poro pequeño. Soluciones a esta dicotomía pueden hallarse mediante el uso de mechas no homogéneas compuestas de varios materiales diferentes (Figura 1.1-3b).

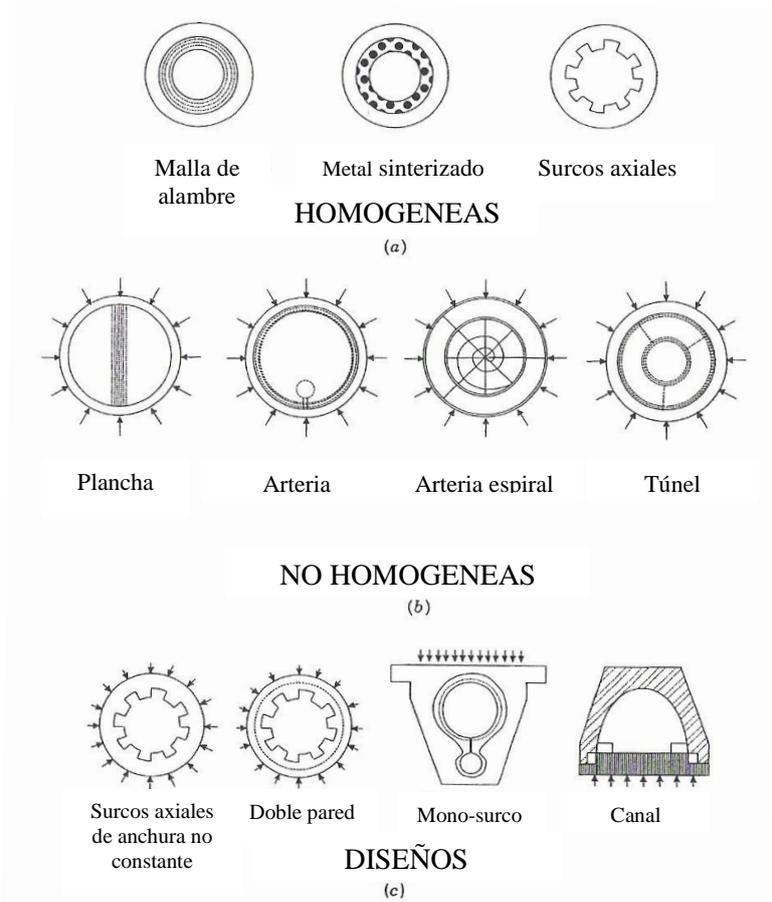


Figura 1.1-3 Configuraciones típicas y estructuras de mecha de tubo de calor. Varios de los diseños avanzados de mecha, separan las corrientes de líquido y vapor para reducir la fuerza de corte viscosa que ocurre en el flujo a contracorriente líquido-vapor.

Por ser la vaporización y la condensación del fluido de trabajo la base de operación del tubo de calor (y en particular del termosifón), la elección de un fluido adecuado es un factor importante en el diseño de los tubos de calor. Cada aplicación de un tubo de calor tiene un rango de temperatura en el cual el tubo de calor tiene que operar. Y en consecuencia el fluido de trabajo debe soportar dicho rango de temperatura (Figura 1.1-4). La capacidad de transporte de calor de un fluido depende de sus propiedades termo-físicas, como por ejemplo el calor latente de vaporización, la tensión superficial y la densidad.

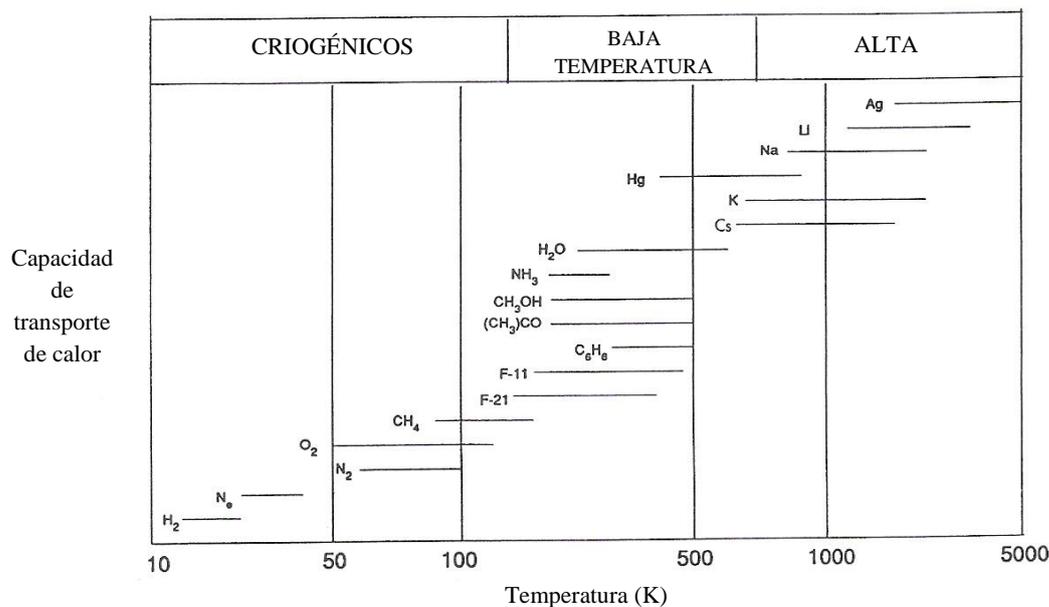


Figura 1.1-4 Posibles rangos de temperatura de trabajo para algunos de los fluidos de los tubos de calor. Como regla, el rango útil se extiende desde que la presión de saturación alcanza 0,1 atm hasta las 20 atm. Por debajo de 0,1 atm, la falta de presión podría impedir el flujo de vapor por el tubo de calor. Por encima de 20 atm, el espesor del recipiente puede crecer hasta el punto que el tubo de calor esté limitado por la resistencia térmica a través del recipiente.

1.2 ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL

El *termosifón* difiere del *tubo de calor* únicamente en la virtud de este último de transportar calor en contra de la gravedad. Por lo demás son dispositivos muy semejantes tanto en su estructura como en su funcionamiento. Se puede decir que el termosifón es un tipo particular de tubo de calor, por lo que un estudio histórico del tubo de calor engloba al del termosifón.

La familia Perkins, en el Reino Unido, introdujo una serie de patentes sobre un dispositivo llamado “Tubo de Perkins” (Figura 1.2-1), desde mediados del siglo diecinueve hasta el siglo veinte. Este dispositivo, predecesor del actual tubo de calor, consistía en un tubo sin mecha asistido por gravedad, en el cual la transferencia de calor se llevaba a cabo por un cambio de fase.

La introducción del concepto de tubo de calor la realizó Gaugler, de General Motors Corporation, en 1944. Pensó en un aparato capaz de evaporar el líquido en una posición más elevada que la del condensador, sin necesidad de ningún aporte de energía extra para elevar de nuevo el líquido hacia el evaporador. Este dispositivo consistía en un tubo cerrado, en el cual el líquido absorbía calor en una zona superior causando la evaporación del mismo. El vapor bajaba por el tubo para condensarse y ceder su calor latente en la otra zona inferior. El condensado, retornaba a la parte superior del tubo por presión capilar para iniciar de nuevo el proceso. Gaugler sugirió una estructura capilar consistente en una mecha de hierro sinterizado. Trabajando en aquellos momentos en problemas de refrigeración, Gaugler propuso un sistema de refrigeración que usaba un tubo de calor para transferir el calor del interior de un

compartimento hacia un recipiente inferior con hielo picado (Figura 1.2-2). De todas formas, esta idea no prosperó y no fue aplicada por General Motors.

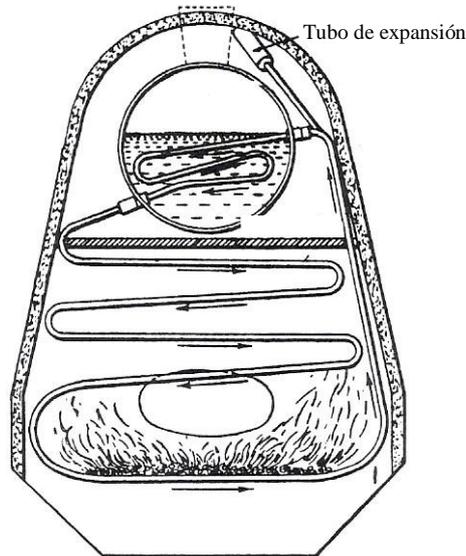


Figura 1.2-1 Tubo de Perkins

No fue hasta 1962 que Trefethen resucitó la idea del tubo de calor para el programa espacial. Y poco después Grover, en 1963, reinventó independientemente el tubo de calor, por medio de una patente en el Laboratorio Nacional de Los Alamos en Nuevo Méjico. Grover y otros en 1964 y 1966 construyeron varios prototipos de tubos de calor, comenzando con agua como fluido de trabajo, y siguiendo con sodio para llegar a temperaturas de 1100 K. También demostró la eficacia como dispositivo de gran rendimiento para la transmisión de calor y desarrolló aplicaciones para su uso. En otra patente, de 1966, en nombre de la Comisión de Energía Atómica de EEUU, Grover acuñó el nombre de “tubo de calor” y declaró “Con algunas limitaciones en su uso, el tubo de calor puede considerarse como una estructura ingenieril sinérgica, que es equivalente a un material con conductividad térmica muy superior a la de cualquier metal conocido”. En esta patente, aun con limitado análisis teórico, presentó resultados experimentales obtenidos de un tubo de calor de acero inoxidable con mecha de rejilla y con sodio, plata y litio como fluidos de trabajo.

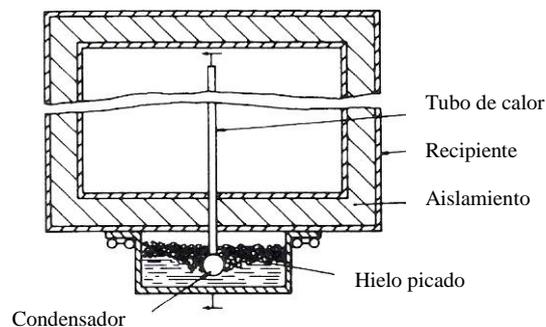


Figura 1.2-2 Unidad de refrigeración sugerida por Gaugler en 1944.

El tubo de calor fue inicialmente reconocido como un dispositivo térmico fiable gracias a la primera publicación de Cotter (1965) sobre tubos de calor, donde aparecían unos resultados teóricos preliminares. A partir de esta publicación las investigaciones comenzaron por todo el mundo. En el Laboratorio de Energía Atómica en Harwell del Reino Unido experimentaron con tubos de calor con sodio. Trabajos similares comenzaron a realizarse en el Centro de Investigación Nuclear en Ispra, Italia, el cual pronto se convertiría en el centro de investigación más activo fuera de EEUU. Poco después, otros países como Alemania, Francia y la URSS iniciaron investigaciones en este sentido.

En 1964, RCA (Radio Corporation of America) comenzó a investigar con tubos de calor y se convirtió en la primera organización comercial en hacerlo. Se usaron para el recipiente, materiales como cobre, níquel, acero inoxidable, molibdeno, TZM de molibdeno. Y como fluido de trabajo agua, cesio, sodio, litio y bismuto. Mediante investigaciones experimentales llegaron a temperaturas de trabajo máximas de 1650 °C.

Los comienzos en el desarrollo de las aplicaciones terrestres de los tubos de calor fueron lentos. Debido a la capacidad de los tubos de calor para operar en campos microgravitacionales, los primeros esfuerzos fueron encaminados hacia aplicaciones espaciales. Sin embargo, el gran costo de la energía, especialmente en Japón y Europa, ha convertido a los tubos de calor y a los termosifones en atractivos instrumentos para el ahorro de energía para la industria. Hoy día, todos los países desarrollados se han involucrado en la investigación, desarrollo y comercialización de los tubos de calor.

1.3 APROXIMACIÓN A LA FÍSICA

1.3.1 Los principios físicos que gobiernan el funcionamiento de los tubos de calor

Tanto en el tubo de calor como en el termosifón ocurre el proceso físico, la transferencia de calor de vapor: el fluido de trabajo absorbe el calor recibido en la sección del evaporador, lo transporta por el tubo y cede la energía en el condensador. En este proceso se mueve mucha energía. En la vaporización, es necesario separar las moléculas que están en contacto en estado líquido, y esto ocurre con un gran aporte de energía (la cantidad de energía necesaria para evaporar una unidad de masa de líquido a una temperatura determinada es el calor latente de vaporización).

En la vaporización dentro del tubo también ocurre otro fenómeno, la presión en la sección del evaporador se incrementa. La presión es causada por la excitación térmica de las moléculas que componen el vapor recientemente generado. Esta presión de vapor establece una diferencia de presión entre los dos extremos del tubo, y esta diferencia de presión es la causante del movimiento del vapor por el tubo, y por lo tanto del transporte de la energía de calor. Cuando el vapor alcanza el extremo del tubo donde está el condensador, se encuentra una temperatura inferior a la del evaporador. Como consecuencia, el vapor vuelve al estado líquido y cede la energía térmica almacenada como energía de vaporización. Además, al producirse la condensación, la presión de vapor creada por las moléculas decrece, de modo que la diferencia de presión necesaria para el flujo del calor de vapor se mantiene.

Es importante tener en cuenta que el fluido vaporizado almacena la energía térmica a la temperatura a la que el vapor fue creado, y la mantendrá a esa temperatura hasta que se ponga

en contacto con una superficie más fría. Como resultado, la temperatura a lo largo de la longitud del tubo tiende a mantenerse constante. Es esta tendencia a oponerse a cualquier cambio de temperatura en el tubo de calor o termosifón la responsable de la alta conductancia térmica del dispositivo.

En los tubos de calor, el movimiento de fluido de trabajo condensado es llevado a cabo por un efecto capilar en la estructura porosa que conecta el condensador con el evaporador. De este modo, el tubo de calor puede trabajar en contra de la fuerza de la gravedad y sin un aporte externo de energía. El motor que causa este movimiento es la tensión superficial del líquido, que es resultado de las fuerzas de atracción entre las moléculas del líquido. En todo líquido cada molécula está rodeada de otras moléculas, con lo que la atracción generada por las moléculas adyacentes en un sentido es equilibrada por una atracción igual de las otras moléculas adyacentes en la otra dirección. El resultado global es que no ocurre ningún movimiento. En la superficie, sin embargo, no hay atracción en el exterior que equilibre la que sí hay en el interior del líquido. En consecuencia, hay una fuerza neta que tiende a tirar de las moléculas superficiales hacia el interior y crear una forma con el mínimo área superficial. Esta tendencia explica porqué las gotas y las burbujas tienden a ser esféricas.

Cuando un fluido se vierte en un recipiente de un material al cual el fluido “moja” bien, entre el fluido y la pared del recipiente se produce una fuerza de atracción. Esta fuerza se combina con la tensión superficial de tal forma que la superficie del líquido se mueve hacia la zona del recipiente sin líquido (Figura 1.3-1). Si el recipiente es un tubo capilar de diámetro pequeño (o un material poroso con continuos poros pequeños), la fuerza, denominada atracción capilar, puede ser mayor que el peso del líquido en el tubo capilar. Entonces, ocurre un rápido movimiento del fluido.

Así, la estructura porosa (o mecha), proporciona un medio por el cual el líquido se bombea a sí mismo. Este proceso continuaría indefinidamente en ausencia de otras fuerzas (como en el espacio ingravido). Si el movimiento es en contra de una fuerza como la gravedad, se llegará a un límite, cuando el peso de la columna de fluido bombeada sea igual a la fuerza de bombeo.

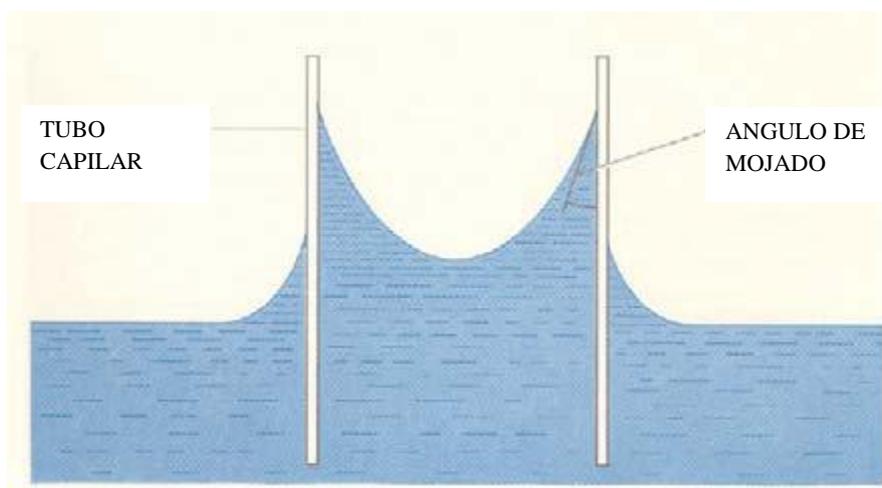


Figura 1.3-1 El efecto capilar en la mecha del tubo de calor proporciona el medio por el cual retorna el líquido condensado a la sección del evaporador, para reponer el suministro de vapor. Una fuerza atractiva entre el líquido y el material de la mecha combinada con la tensión capilar del líquido hace que el líquido se mueva hacia la zona seca de la mecha. Esta fuerza de bombeo está determinada por el “ángulo de mojado” del líquido y por el tamaño del poro de la mecha.

Según los principios físicos vistos, que gobiernan el funcionamiento de los tubos de calor, un fluido de alto rendimiento como fluido de trabajo debe tener un alto calor latente de vaporización, una alta tensión superficial y una baja densidad. Una baja viscosidad también es deseable para minimizar la resistencia al avance del fluido por la mecha.

1.3.2 Límites de funcionamiento de los tubos de calor y los termosifones

Aunque el tubo de calor sea un dispositivo notablemente versátil, debe operar bajo ciertas limitaciones de diseño. El funcionamiento de un tubo de calor está gobernado por cuatro factores: (1) la potencia máxima que puede ser transmitida en un dispositivo de un tamaño dado, (2) la potencia máxima por unidad de superficie en el evaporador que puede ser absorbida con seguridad, (3) la máxima y mínima temperatura útil para un fluido de trabajo dado, (4) el grado de operación en un campo gravitacional o en otras aceleraciones. Vayamos a considerarlas separadamente.

El límite de potencia que es capaz de transmitir un tubo de calor dado lo determinan varios factores:

- La capacidad última de bombeo de la mecha, llamada “límite de capilaridad”. Si el tubo de calor trabaja por encima de este límite, el evaporador no recibe el suficiente fluido de trabajo que absorba el calor proveniente de la fuente. Por consiguiente, la temperatura del evaporador sube rápidamente. Esta última capacidad de bombeo de la mecha viene determinada por el tamaño y geometría de la estructura capilar así como por las propiedades del fluido (calor latente de vaporización, tensión superficial, densidad del líquido y viscosidad). Por no tener estructura capilar, los termosifones no tienen este límite. Pero podemos encontrar un límite similar, el llamado “límite de secado”. Este límite ocurre cuando en el fondo del evaporador del termosifón no queda prácticamente fluido de trabajo (el depósito de fluido de la Figura 1.1-2 prácticamente no existiría). Por lo tanto, la totalidad de fluido de trabajo está circulando por el termosifón, tanto como película de fluido cayendo por las paredes del recipiente como flujo de vapor. En estas condiciones, si el calor entrante por el evaporador es aumentado, el punto más bajo del termosifón comienza a secarse (la película de fluido no llega hasta el fondo), con la consiguiente subida de temperatura en la pared.
- En algunos tubos de calor, especialmente en aquellos que operan con metales líquidos, el vapor puede alcanzar valores sónicos o supersónicos. A esta condición de trabajo se la llama “límite sónico”.
- Cuando la velocidad del vapor en el tubo de calor es suficientemente alta, la fuerza de corte existente en la interfase líquido-vapor puede arrancar líquido de la superficie de la mecha e introducirlo en el flujo de vapor. Este fenómeno reduce el retorno de condensado al evaporador limitando la capacidad de transporte de calor. Cuando se alcanza esta condición de trabajo se dice que se ha llegado al “límite de arrastre” (en inglés “entrainment limit”). En los termosifones, la fuerza de corte entre el flujo de líquido y vapor dificulta el regreso de condensado al evaporador (a este fenómeno se le conoce como “flooding”), pudiéndose llegar a que la fuerza viscosa interfásica supere a la tensión superficial del condensado y gotas de líquido sean arrastradas hacia el flujo de vapor (“arrastre”). Los fenómenos de flooding y arrastre causan en los termosifones

acumulación de líquido adicional en la sección del condensador además de la posibilidad de secado del evaporador.

- El máximo flujo de calor que un tubo de calor es capaz de transportar puede ser limitado por la capacidad de enfriamiento del condensador. La presencia de gases no condensables puede reducir la efectividad del condensador (disminuyendo el tamaño de este). A este factor se le conoce por “límite de condensador”.

En la ebullición estática como la que ocurre en una olla con agua puesta al fuego, el proceso de vaporización transcurre por tres etapas al tiempo que la potencia entrante es aumentada, llegándose finalmente, a un límite crítico (Figura 1.3-2). En la primera etapa, el calor entrante sólo genera evaporación de líquido en su superficie sin perturbar el cuerpo de líquido restante. La segunda etapa incluye a la llamada “ebullición nucleada”, durante la cual las burbujas de vapor suben desde el interior del fluido hacia la superficie. Al tiempo que la potencia térmica se incrementa y las burbujas se hacen más vigorosas, estas empiezan a formar una capa en la interfase recipiente-fluido. Esta situación, llamada *ebullición de película*, es la tercera etapa de vaporización. El efecto de la ebullición de película es que la capa de burbujas reduce drásticamente la transferencia de vapor desde la superficie de entrada de calor, causando como resultado un aumento de temperatura en la mencionada superficie. El comienzo de la ebullición de película, por lo tanto, representa una densidad de potencia de entrada crítica que no puede ser superada sin riesgo de dañar el material del recipiente. Crecientes evidencias indican que una alta pureza del fluido, la presencia de la mecha y el movimiento del fluido por la mecha tienden a prevenir la formación de burbujas y por lo tanto reducen en riesgo de formación de la película de burbujas. Pero en los termosifones, la ebullición es como la explicada arriba, siendo por lo tanto más fácil llegar a este llamado “límite de ebullición”.

Con el aumento de temperatura del tubo de calor, la velocidad de evaporación, y consecuentemente la presión de vapor del fluido de trabajo, crece rápidamente. El transporte de potencia también sube, por ser la vaporización del fluido de trabajo la responsable de la transmisión de calor. Para cada fluido de trabajo hay una temperatura mínima por debajo de la cual la velocidad de evaporación se convierte insuficiente para realizar un transporte de la potencia térmica suave. Hay también un máximo de temperatura del fluido de trabajo que depende de la presión que el tubo de calor puede soportar de forma segura. Al tiempo que la velocidad de vaporización aumenta con la temperatura, la presión de vapor en el tubo también lo hace, tensionando las paredes del recipiente. La máxima temperatura, por lo tanto, está determinada por la resistencia del material del recipiente del tubo de calor.

Repetiendo lo anteriormente dicho, la fuerza que mueve el condensado por la mecha hacia el evaporador es la tensión superficial del fluido. Si un tubo de calor está sometido a una fuerza que se opone al retorno del condensado (como la aceleración de la gravedad), menos fluido puede ser movido porque parte de la fuerza de la tensión superficial tiene que soportar la nueva fuerza en contra. Este efecto reduce la capacidad del tubo de calor a transportar energía térmica. En esta situación, el calor latente de vaporización, la densidad del líquido y la viscosidad del fluido de trabajo determinan la capacidad del tubo de calor. El calor latente de vaporización determina la cantidad de fluido que debe ser evaporado para transportar la potencia calorífica requerida y por lo tanto la cantidad de condensado que debe ser devuelto. La densidad del líquido controla la masa que debe ser transportada por la tensión superficial. La viscosidad determina la cantidad de fricción que se opone al fluir del condensado por la mecha. Los efectos de dichas fuerzas exteriores pueden ser reducidos disminuyendo el tamaño de los poros capilares con objeto de aumentar la superficie de la estructura capilar y consecuentemente su

capacidad de bombeo. Aunque una reducción del tamaño del poro también trae un aumento de la fricción viscosa por el aumento de la superficie. Un tubo de calor, trabajando en contra de la gravedad (que es cuando está en posición vertical, con el evaporador en lo alto) y con litio como fluido de trabajo, reduce la capacidad de transporte de calor un 10% en comparación con la posición horizontal. Con mercurio, esta diferencia puede ser de varios órdenes de magnitud.

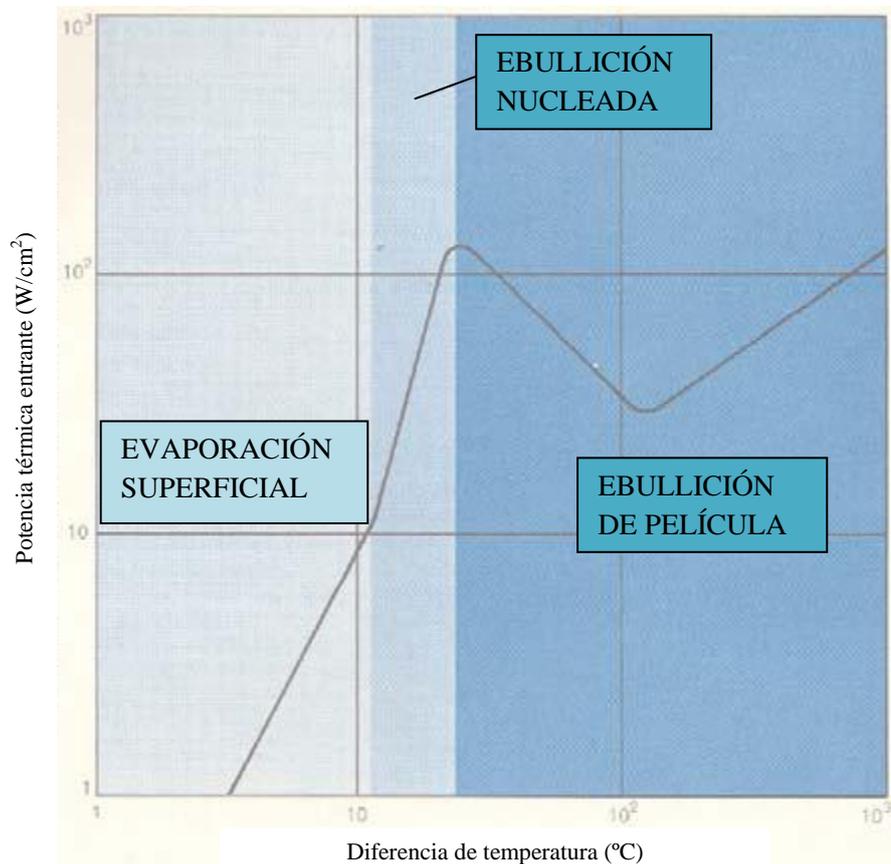


Figura 1.3-2 Las tres etapas de vaporización. Se muestra la diferencia de temperatura entre la superficie exterior de un recipiente y la superficie de un fluido bullendo en el interior del recipiente como función de la densidad de potencia térmica entrante.

1.4 PROPIEDADES DE LOS TUBOS DE CALOR Y LOS TERMOSIFONES

Hay seis propiedades de los tubos de calor en general, y de los termosifones en particular, que merecen ser mencionadas ya que sirven para definir las áreas en las cuales deben ser buscadas las aplicaciones para estos dispositivos. La primera, los dispositivos que trabajan por el principio de transferencia de calor de vapor pueden tener varios miles de veces mayor capacidad de transferencia de calor que los mejores conductores metálicos, como la plata o el cobre. En una ocasión, una energía térmica de 11.000 vatios fue transmitida a 70 cm por un tubo de calor de una pulgada con una pérdida de temperatura tan pequeña que fue difícil medir con precisión. A modo de comparación, se hubiera necesitado un bloque de cobre de 2,75 metros de diámetro, de unas 40 toneladas de peso, para obtener el mismo resultado.

Una segunda propiedad de estos dispositivos es el llamado “aplanamiento de temperatura” (“temperature flattening” en inglés). Hay muchas aplicaciones de transmisión de calor en las que se necesita grandes áreas superficiales a una temperatura uniforme. Sin un tubo de calor, se requeriría mucho cuidado para asegurar una temperatura uniforme de la fuente de calor. Sin embargo, se podría acoplar un tubo de calor o un termosifón a una fuente de calor no uniforme y obtener una temperatura uniforme a la salida. Esta declaración es verdadera, ya que la evaporación y condensación del fluido de trabajo tienen lugar prácticamente a la misma temperatura. Variaciones en la temperatura de la fuente afectan solamente al ritmo de evaporación; un aumento de la temperatura de la fuente de calor en un punto del evaporador causa una subida del ritmo de evaporación en ese punto sin afectar a la temperatura de evaporación. La condensación del fluido de trabajo en la zona de entrega de calor tiene lugar a la temperatura a la que ocurrió la evaporación, sin importar la forma de entrada de calor. El tubo de calor es por tanto un dispositivo isotérmico para la mayoría de los propósitos prácticos en ingeniería.

Tercero, los procesos de evaporación y condensación de un tubo de calor son operaciones independientes conectadas solo por las corrientes de vapor y de líquido en el interior del tubo. Las condiciones y el área de la evaporación y la condensación son independientes. Por lo tanto el proceso en uno de los extremos del tubo puede ser uniforme o no uniforme, sobre una grande o pequeña área superficial, sin influir mucho en lo que esté ocurriendo en el otro extremo. Esta separación de funciones conduce a una de las propiedades más valiosas del tubo de calor: su habilidad para concentrar o dispersar el calor, llamada “transformación de flujo de calor” (en inglés “heat-flux transformation”). Se puede introducir una gran potencia sobre un área pequeña o una baja potencia sobre una gran área, evaporándose en ambos casos la misma cantidad de fluido de trabajo. De forma similar, una cantidad de vapor puede ser condensada rápidamente sobre una pequeña área o lentamente sobre una gran área. Es la razón de la superficie de evaporación frente a la superficie de condensación la que determina si la energía térmica está siendo dispersada o concentrada a una temperatura constante. De esta manera, la potencia térmica disponible por unidad de superficie de intercambio de calor puede ser tanto aumentada como disminuida. Esta propiedad del tubo de calor hace posible juntar fuentes y usuarios de calor anteriormente incompatibles por sus diferencias en la velocidad de la transferencia de calor natural. Esta propiedad es particularmente útil en el control térmico de componentes y sistemas electrónicos, porque permite reducir los grandes flujos de calor generados al nivel del componente y así disipar sin problemas el calor por convección forzada o natural.

Una cuarta propiedad del tubo de calor es que hace posible separar la fuente de calor del sumidero de calor. Es frecuentemente indeseable tener la fuente de calor y el consumidor del calor en contacto. En un reactor nuclear, sería necesario transportar el calor a través del blindaje contra la radiación hacia el punto de uso, sin tener descenso de temperatura.

Como quinta propiedad, el tubo de calor puede ser actuado de modo que la potencia calorífica y/o la temperatura a la que la potencia es evacuada por el condensador pueda mantenerse constante a pesar de una gran variación de la potencia de entrada al tubo de calor. Esto se consigue con los llamados tubos de calor de conductancia variable, que se verán en el siguiente apartado.

Y la sexta y última propiedad, es la rápida respuesta térmica de los tubos de calor en comparación con otros tipos de transmisores del calor, en particular de los conductores sólidos. Y además, no es función de la longitud del tubo de calor.

1.5 TIPOS DE TUBOS DE CALOR

Se han diseñado tubos de calor de gran variedad de tamaños, desde muy pequeños con 0,6 mm x 0,6 mm de sección y 25 mm de longitud, hasta muy grandes de 100 m de longitud. Todos los tubos de calor tienen un evaporador y un condensador donde el fluido de trabajo se evapora y condensa respectivamente; pero también los hay con una zona adiabática (donde no hay transmisión de calor con el exterior) que separa el evaporador del condensador. Un tubo de calor puede tener múltiples evaporadores, condensadores y secciones adiabáticas. Normalmente el fluido condensado se hace circular por medio de la fuerza capilar en una estructura porosa. Pero también se usan fuerzas como la gravitacional, la centrífuga, la electrostática o la osmótica para devolver al líquido desde el condensador al evaporador. El recipiente habitualmente es de forma cilíndrica, por simplicidad de diseño y fabricación, aunque también se diseñan con formas rectangulares, cónicas...

1.5.1 Termosifón bifásico

Un termosifón bifásico es un tubo de calor sin mecha asistido por la fuerza de la gravedad (ver Figura 1.1-2). El condensador se sitúa encima del evaporador para que el condensado vuelva por gravedad. Al igual que en los tubos de calor con mecha, los límites “sónico” y “de vapor” son restricciones de operación de los termosifones. El “entrainment limit” (“flooding” en los termosifones) es de mayor severidad en los termosifones que en los tubos de calor con mecha, debido a la superficie libre del líquido. En el límite de “flooding” la temperatura de la pared del termosifón comienza a oscilar además de subir la presión interna. El límite de ebullición en los termosifones es debido a la ebullición de película más que a la ebullición nucleada que ocurre en los tubos de calor con mecha. El límite de secado se puede alcanzar para pequeños volúmenes de llenado.

El funcionamiento de los termosifones es sensible al volumen de llenado de fluido de trabajo. Se ha comprobado experimentalmente que el flujo de transferencia de calor máximo aumenta con la cantidad de fluido de trabajo hasta un cierto valor. En algunas ocasiones se incorpora en los termosifones una mecha para retardar el límite de “flooding” y mejorar el contacto entre la pared y el líquido. El límite de capilaridad no se tiene generalmente en cuenta en la operación de los termosifones ya que es la gravedad la fuerza encargada del retorno del fluido condensado.

1.5.2 Tubo de calor impulsado por capilaridad

Un tubo de calor impulsado por capilaridad consiste en un recipiente cerrado, en el cual se ha puesto una estructura capilar por la parte interna de la pared del recipiente (ver Figura 1.1-1). Generalmente, la limitación de funcionamiento de un tubo de calor impulsado por capilaridad es el límite capilar. Los tubos de calor se han empleado mayormente en aplicaciones aeroespaciales, como en la estabilización de temperatura de satélites, donde un lado de la estructura está orientado al sol y el otro al vacío espacial. Aún así, el empleo de tubos de calor en aplicaciones terrestres está empezando a ser más común.

1.5.3 Tubo de calor anular

El tubo de calor anular es similar al convencional tubo de calor impulsado por capilaridad, excepto en la forma de la sección donde va el vapor que es anular en vez de circular (ver Figura 1.5-1). Esto posibilita la puesta de mecha además de en la parte interna del tubo exterior, en la parte externa del tubo interior. De esta manera, el área superficial de entrada y salida de calor pueden ser incrementadas significativamente sin aumentar el diámetro exterior del tubo de calor. Por lo tanto, el límite capilar del tubo de calor anular es mayor que el de uno convencional de mismas dimensiones exteriores.

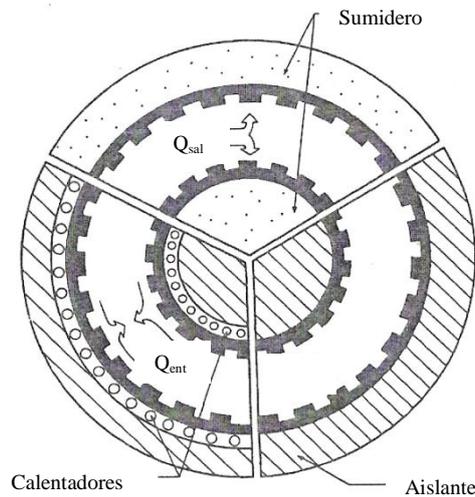


Figura 1.5-1 Tubo de calor anular. Vistas de las secciones del evaporador, zona adiabática y condensador.

1.5.4 Tubo de calor plano

El tubo de calor plano está impulsado por capilaridad y es de forma rectangular (ver Figura 1.5-2). Este tipo de tubo de calor es un excelente candidato para usarse en aplicaciones de refrigeración electrónica. Se pueden montar en forma de matriz pequeños semiconductores o paquetes de transistores encima del tubo de calor para ser enfriados.

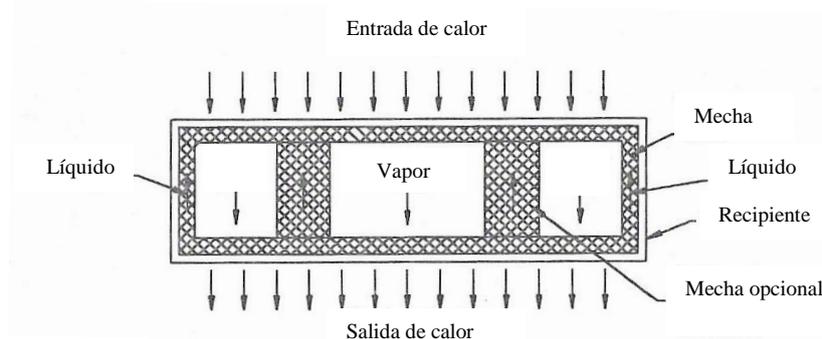


Figura 1.5-2 Tubo de calor plano.

1.5.5 Tubo de calor giratorio

El tubo de calor giratorio está fabricado en forma de disco (ver Figura 1.5-3). El calor entra por el radio exterior y es evacuado en el radio interior, lo cual permite al condensado volver al evaporador por medio de la fuerza centrífuga. Por lo tanto no es necesaria una estructura capilar en este tipo de tubo de calor. Aplicaciones como el enfriamiento de componentes de turbinas o frenos de automóvil han sido propuestos para este tipo de tubos de calor.

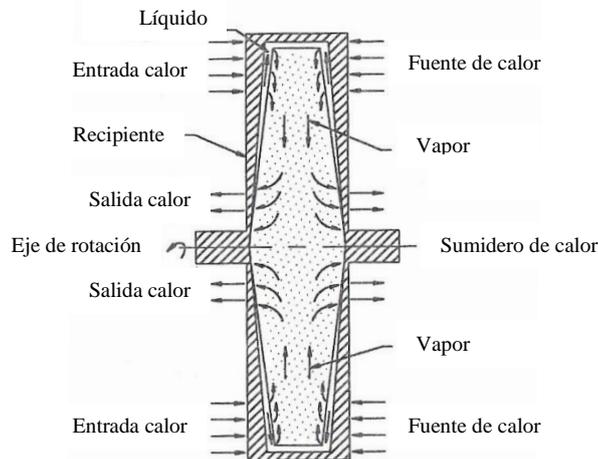


Figura 1.5-3 Tubo de calor giratorio.

1.5.6 Tubo de calor de borde de ataque

Los tubos de calor de borde de ataque se han propuesto para enfriar los bordes de ataque de aviones supersónicos y vehículos de reentrada (ver Figura 1.5-4). El tubo de calor recubre el borde de ataque de las alas, donde el calentamiento aerodinámico es mayor. El calor es absorbido y transportado por el tubo de calor al condensador, donde es expulsado por radiación y/o convección.

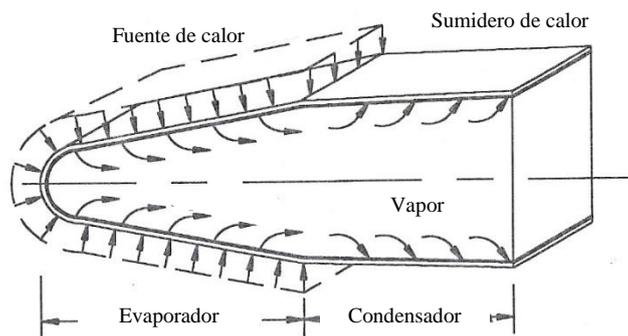


Figura 1.5-4 Diseño conceptual de un tubo de calor de borde de ataque.

1.5.7 Tubo de calor cargado con gas

Los tubos de calor cargados con gas son un tipo de tubos de calor de conductancia variable. El tubo de calor cargado con gas, mostrado en la Figura 1.5-5, es igual que un tubo de calor impulsado por capilaridad o un termosifón de dos fases con la salvedad de que un gas no

condensable es introducido en su interior. Durante el funcionamiento, este gas es arrastrado hacia la zona del condensador por el fluido de trabajo en forma de vapor. Dado que la condensación del fluido de trabajo no se produce donde está el gas no condensable, se bloquea parte del condensador de su función de transferir calor al sumidero (ver Figura 1.5-5_a). Si se aumenta la entrada de calor por el evaporador, aumenta la temperatura del vapor y del gas, comprimiendo de esta manera el gas inerte. Esto a su vez incrementa la superficie del condensador disponible para transferir calor (ver Figura 1.5-5_b). Este proceso da como resultado la capacidad del tubo de calor cargado con gas de mantener aproximadamente constante la temperatura del evaporador sin importar la entrada de flujo de calor.

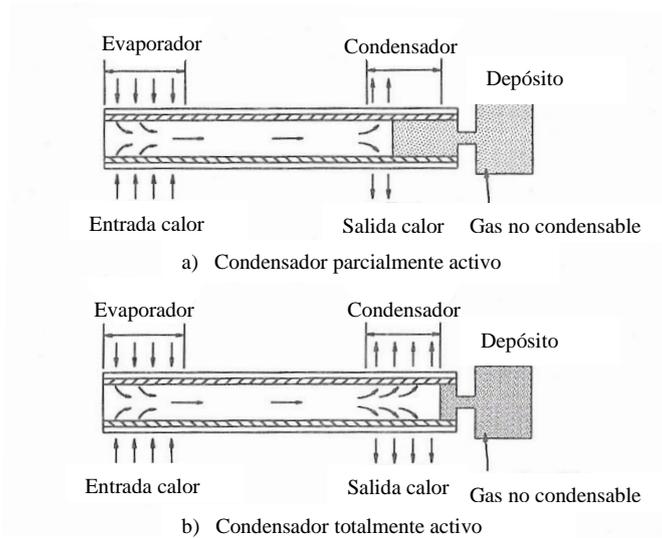


Figura 1.5-5 Funcionamiento de un tubo de calor de conductancia variable cargado con gas.

1.5.8 Tubo de calor de lazo

En el esquema de la Figura 1.5-6 se muestra el funcionamiento de los tubos de calor de lazo. Un flujo de calor entra por el evaporador, el cual está compuesto por una mecha introducida en un tubo estriado. El calor aplicado a la parte externa del evaporador vaporiza el fluido de trabajo en forma de líquido, circulando este a través del tubo estriado hasta la cabecera de vapor. El vapor se mueve hacia el condensador donde se condensa, primero como una película en la cara interna del tubo, y luego como pequeñas masas de líquido. Antes de alcanzar el evaporador, el líquido pasa por un subenfriador en el cual colapsan todas las burbujas de vapor remanentes. La presión capilar generada en la mecha bombea continuamente el fluido de trabajo a través del ciclo. Un depósito controla la cantidad de fluido de trabajo en el ciclo, además de controlar la temperatura de trabajo del sistema (equivalente en su funcionamiento al tubo de calor de conductancia variable).

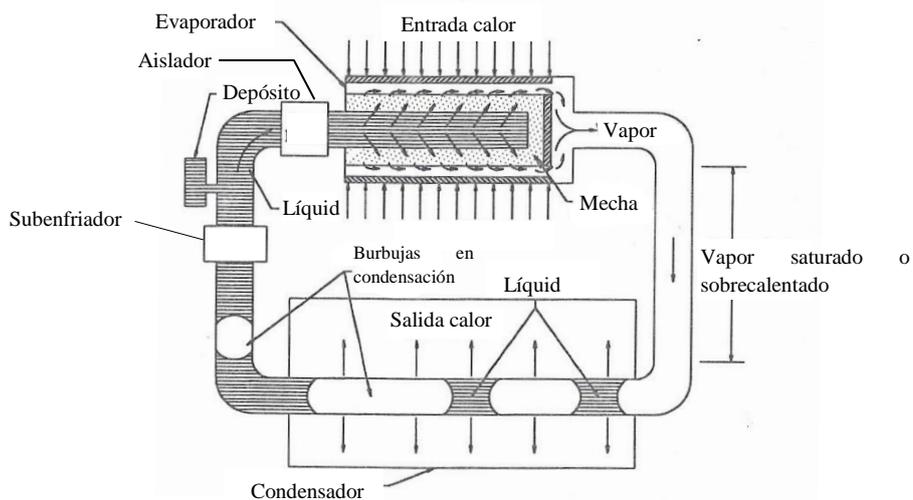


Figura 1.5-6 Tubo de calor de lazo.

Varios factores hacen del tubo de calor de lazo una opción atractiva frente a los convencionales tubos de calor: Ya que la mecha se localiza sólo en el evaporador, el resto de las paredes del ciclo pueden ser lisas, lo cual reduce las pérdidas de presión en el vapor y el líquido. Las pérdidas de presión también se reducen al ser los flujos de líquido y vapor en la misma dirección, al contrario que en los convencionales tubos de calor donde los flujos son a contracorriente. Por esta razón, la fuente de calor y el sumidero de calor pueden estar separados a mayores distancias.

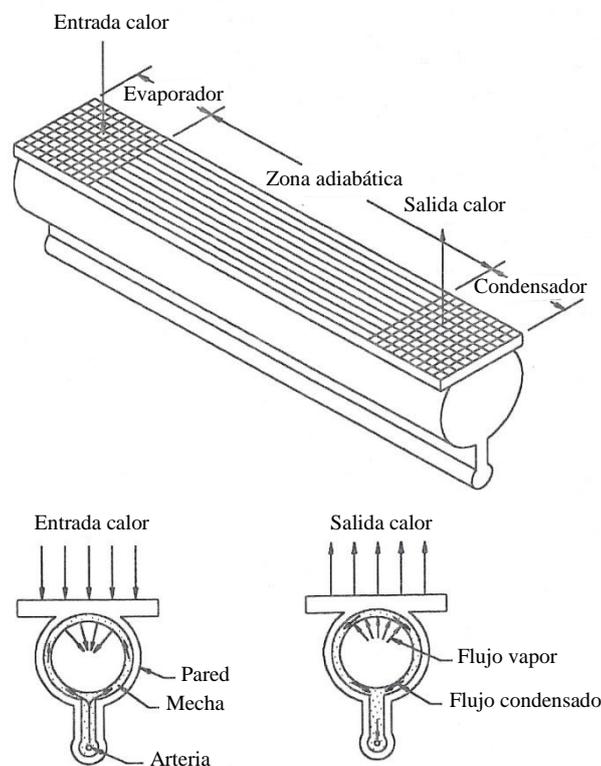


Figura 1.5-7 Tubo de calor de arteria.

1.5.9 Tubo de calor de arteria

En el tubo de calor de arteria el flujo de calor el espacio de vapor se separa del camino de retorno del condensado (ver Figura 1.5-7). El intercambio calor entrante y saliente se hace a través de la cara plana de la parte superior. Como el calor no se transfiere a través de la pared del camino de retorno del condensado, se reduce la posibilidad de bloqueo de la arteria debida a la aparición de burbujas de vapor. Este tipo de tubo de calor se ha propuesto para su uso en sistemas espaciales de evacuación del calor.

1.6 APLICACIONES DE LOS TUBOS DE CALOR

1.6.1 Aplicaciones aeroespaciales

Los tubos de calor son componentes muy atractivos en el campo de refrigeración y estabilización de temperatura de naves espaciales, debido a su bajo peso, nulo mantenimiento y fiabilidad. Durante la órbita, un observatorio espacial se fija en un solo punto del espacio (por ejemplo una estrella). Por lo tanto un lado de la nave está sometido a una intensa radiación solar mientras que el otro se expone al profundo espacio. En esta situación es importante hacer una isothermalización de la estructura para evitar una deformación estructural. Se han usado tubos de calor para transportar el calor desde el lado irradiado por el sol hacia el lado frío para igualar la temperatura de la estructura. También se han usado tubos de calor para disipar el calor generado por componentes electrónicos en satélites.

1.6.2 Intercambiadores de calor

El incremento del coste de la energía ha promovido la aparición de nuevos métodos de conservación de energía en aplicaciones industriales. Dada la alta capacidad de transmisión de calor sin aportación externa de energía de los tubos de calor, se están usando en intercambiadores de calor en varias aplicaciones. En la industria de la generación de energía, se están usando intercambiadores de calor formados por tubos de calor como calentadores primarios de aire en las nuevas calderas. Las mayores ventajas de este tipo de intercambiadores frente a los intercambiadores de calor convencionales son, por un lado, su isothermicidad, y también su mayor estanqueidad que reduce las fugas. Los calentadores de aire con tubos de calor son, también, más baratos que los convencionales intercambiadores de calor tubulares porque son más pequeños y se pueden transportar en un menor número de módulos. Los intercambiadores de calor formados por tubos de calor pueden servir como sistemas compactos de recuperación de energía residual, que no requieren aporte de energía y son fáciles de instalar en líneas existentes (ver Figura 1.6-1).

Los intercambiadores de calor formados por tubos de calor pueden ser de tres tipos diferentes: gas-gas, gas-líquido y líquido-líquido. Entre estos tres tipos, el más usado es el intercambiador de tubos de calor gas-gas. Este último consiste en un conjunto de tubos de calor con aletas exteriores que recuperan el calor residual. Estas unidades eliminan la contaminación entre corrientes gracias a una sólida pared posicionada entre los flujos de gas caliente y gas frío. Las unidades de recuperación de energía gas-gas se pueden clasificar en tres categorías: recuperación de energía en sistemas de aire acondicionado (baja temperatura), recuperación del calor en exceso en un proceso para calefacción (temperatura moderada) y recuperación de la

energía residual a alta temperatura de la corriente de humos de escape para reusarlo en el proceso (precalentamiento del aire de combustión, por ejemplo).

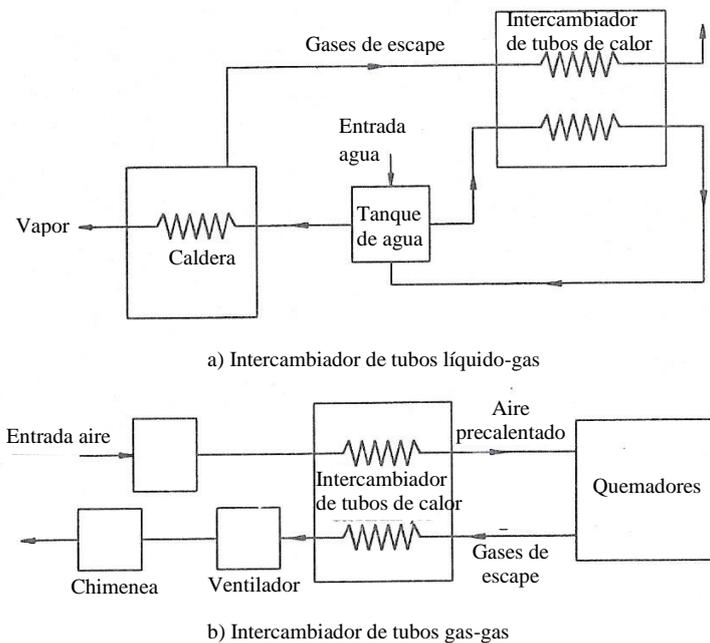


Figura 1.6-1 Recuperación de calor residual usando intercambiadores de tubos de calor.

1.6.3 Refrigeración de equipamiento eléctrico y electrónico

La miniaturización de los componentes electrónicos trae consigo un incremento en la exigencia a los sistemas de disipación del calor, debido al aumento de la densidad de los componentes. Un ejemplo claro son los chips utilizados en los ordenadores. La fiabilidad de este y otros tipos de componentes eléctricos es sensible a la temperatura de operación, con lo que unos buenos evacuadores de calor como los tubos de calor se hacen muy necesarios.

En equipamientos eléctricos de gran tamaño, la aplicación de tubos de calor es importante en tanto que se incrementa la eficiencia cuando el componente funciona a temperaturas más bajas. Se han diseñado motores eléctricos que incorporan tubos de calor en el borde exterior del rotor. Otros diseños sustituyen el eje sólido por un tubo de calor giratorio. Estos diseños evacúan el calor desde el interior del motor eléctrico consiguiendo un funcionamiento a menor temperatura de los cojinetes. Además, ya que la resistencia de los bobinados eléctricos decrece con la temperatura, se necesita menos temperatura para mantener una carga determinada.

1.6.4 Hornos

Una de las primeras aplicaciones de los tubos de calor (realmente termosifones de dos fases) fue en los hornos de cocción. En los normales hornos de cocción de llama, se calentaba el ladrillo refractario para luego conducir el calor hacia la cámara de cocción, con objeto de que la comida no se contaminase con los productos de combustión. Gracias a la llegada de los tubos de calor, el calor era transmitido hacia la cámara de cocción por medio de la evaporación y la condensación del fluido de trabajo en el interior de una matriz de tubos. Esta solución no era

sólo más eficiente, reduciendo en un 25% la cantidad de fuel normalmente necesitada, además ofrecía una temperatura del horno más uniforme. Se han diseñado otros tipos de equipamientos de procesamiento de comida usando tubos de calor como planchas, braseros, hervidores, cacerolas y freidoras.

Se han desarrollado hornos de alta temperatura para tratamientos térmicos, sinterización y otras aplicaciones. Estos hornos son realmente tubos de calor anulares con metal líquido como fluido de trabajo. El comportamiento isotérmico del tubo de calor en su interior lo hace ideal para usarse como horno. Este tipo de horno también se ha usado en la calibración de aparatos de medida de temperatura.

1.6.5 Producción

Una importante aplicación de los tubos de calor es su uso en el campos de fundición y moldeo por inyección. El uso más obvio de los tubos de calor en este campo es la evacuación del calor durante el proceso de solidificación, pero también se usan para minimizar el choque termal en los moldes. En la fundición se introduce un material en estado líquido en un molde cerrado. El material se enfría hasta que se solidifica, la pieza se retira y el proceso se repite. Es importante el tiempo requerido en el enfriamiento del material hasta el estado sólido, por lo que la mayoría de moldes se enfrían con agua. Aún así, hay partes del molde inaccesibles que son difíciles de enfriar, y es aquí donde se usan los tubos de calor que son capaces de llegar hasta estas secciones. Estos mismos tubos de calor pueden, también, precalentar el molde para asegurar el continuo flujo del material líquido, debido a la naturaleza reversible de los tubos de calor.

1.6.6 Medicina y control de la temperatura del cuerpo humano

Una de las nuevas aplicaciones con gran potencial de crecimiento es el uso de tubos de calor en relación con la fisiología humana. Una sonda quirúrgica que incorpora un tubo de calor criogénico está siendo usada para eliminar tumores en el cuerpo humano. Este tipo de cirugía donde el tejido es congelado en vez de irradiado, es beneficiosa porque el tejido circundante no sufre prácticamente daño alguno. Además de esta manera, el sangrado y el dolor son menores.

Otra aplicación en humanos es el control de la temperatura corporal. En climas fríos, los tubos de calor pueden aportar calor desde el torso hacia las extremidades (dedos y orejas) para prevenir su congelación. En la Figura 1.6-2 se aprecia un diseño conceptual de guantes y manoplas con tubos de calor donde el calor corporal es transferido desde el antebrazo hacia los dedos. En ambientes muy calurosos, como al que se someten los bomberos, se podría desarrollar un traje de frío con tubos de calor más ligero y menos voluminoso que los actualmente utilizados.

1.6.7 Sistemas de transporte y deshielo

Se han usado tubos de calor para derretir el hielo y la nieve de las carreteras, puentes y pistas de aterrizaje de aviones transportando el calor geotérmico acumulado en el suelo al pavimento.

El trabajo en barcos en la mar está lleno de problemas asociados con la formación de hielo. A cualquier cosa expuesta a los elementos, como la cubierta o las barandillas, se le está constantemente formando hielo durante el invierno. Habitualmente estas capas de hielo se eliminan con hachas, lo cual es muy peligroso con el mar bravo (caídas por la borda y cortes). Con la incorporación de tubos de calor en la cubierta y las barandillas que aportan el calor de pérdida de los motores, se soluciona este problema. Este calor funde constantemente el hielo antes de la formación de grandes placas.

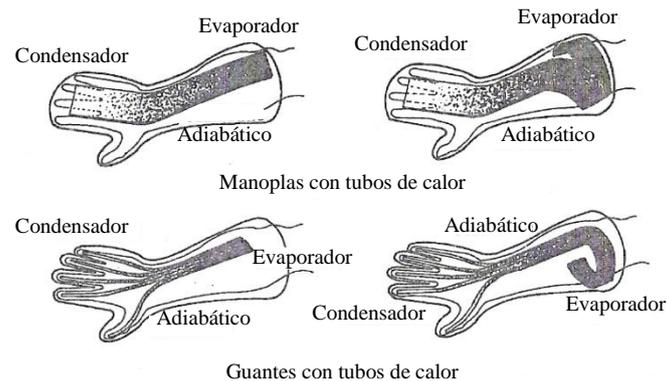


Figura 1.6-2 Modelo de guantes y manoplas con tubos de calor para el frío.

1.6.8 Motores y la industria de la automoción

Se ha fabricado y testado un motor Stirling calentado mediante tubos de calor con sodio como fluido de trabajo. Este motor alcanza su mayor rendimiento cuando la energía térmica le es suministrada a una temperatura muy constante y a un alto flujo de calor. Como fuente de calor puede usarse la energía solar.

También se ha propuesto un termosifón que sigue el ciclo Rankine para generar energía, utilizando la energía solar y otras fuentes de energía calorífica residual. Se trata básicamente de la modificación de un termosifón para incorporar una turbina convirtiendo la energía térmica en energía eléctrica siguiendo el ciclo Rankine (ver Figura 1.6-3).

Una aplicación potencialmente importante es la refrigeración del sistema de freno de los vehículos. Normalmente, las pastillas de freno y los rotores de un sistema de freno convencional sufren los efectos de las altas temperaturas. Los ciclos térmicos provocan tensión y causa un aumento en la cantidad de corrosión, lo cual reduce el tiempo de vida de los rotores. Una alta temperatura en la interfase rotor-pastilla causa la fragilización del material de la pastilla de freno, que a su vez reduce su vida de servicio. Se han propuesto tubos de calor giratorios y estacionarios para enfriar tanto al rotor como a las pastillas de freno, resultando en una menor y más uniforme temperatura. Con la incorporación de los tubos de calor, las pastillas de freno podrían durar la vida entera del automóvil.

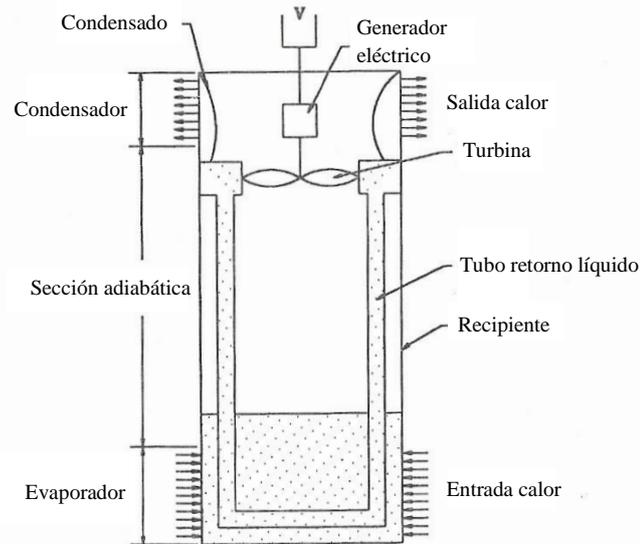


Figura 1.6-3 Termosifón experimental que sigue el ciclo Rankine.

1.6.9 Permafrost

El mantenimiento del permafrost es una cuestión a tener en cuenta en el diseño de los cimientos de un edificio u otras estructuras en las regiones árticas. Durante los meses de verano, el hielo presente en el interior del suelo tiende a derretirse. Esta descongelación permite a los cimientos hundirse o desplazarse, causando de esta manera daños en la construcción. Con objeto de evitar este problema, los ingenieros responsables del oleoducto Trans-Alaskan, colocaron tubos de calor alrededor de los pilares del oleoducto (ver Figura 1.6-4). El calor procedente del suelo adyacente a los pilares se disipa al ambiente por medio de los tubos de calor, lo cual permite mantenerse al permafrost alrededor de los pilares durante todo el año. Este enfriamiento ayuda a reducir la longitud de los pilares, resultando en un ahorro significativo del coste.

1.6.10 Energía solar

Con el aumento del coste del calentamiento del hogar, se ha prestado mayor atención en el uso de tubos de calor para recoger la energía solar. Un diseño relativamente simple incorpora un conjunto de termosifones inclinados el cual se sitúa en la cara sur de una residencia. La energía solar se absorbe y se transporta al interior de la vivienda, donde se transmite por convección al aire interior o se almacena en un tanque con agua para su uso posterior. Durante la noche, el termosifón actúa esencialmente como diodo térmico, ya que la única manera de que el calor pueda transmitirse desde el interior hacia el exterior es por medio de la conducción axial por las paredes del termosifón.

1.6.11 Fabricación

Se han propuesto tubos de calor de alta temperatura para su uso en la fabricación de botellas de cristal. El proceso de dar forma a las botellas de cristal empieza con una introducción periódica de un pistón de acero en un tanque de acero lleno de cristal fundido. Este proceso forma un tubo

de cristal que posteriormente se sopla hasta conseguir su forma final. La temperatura inicial del cristal es de unos 1100 °C y la temperatura del pistón debe mantenerse a unos 600 °C. A una temperatura mayor, el cristal se pegaría al pistón, y a una temperatura menor, la viscosidad del cristal aumentaría produciendo una insuficiente deformación en el proceso de soplado. Cuando la deformación es insuficiente, se producen botellas con paredes finas, lo que contribuye al aumento del porcentaje de fallo. Se ha propuesto y testado un tubo de calor de acero inoxidable con potasio como fluido de trabajo, y se comprobó que se pudo mantener al tubo de calor prácticamente isoterma. Esto resultó en un aumento de la frecuencia de introducción del pistón y en una reducción de la cantidad de botellas defectuosas.

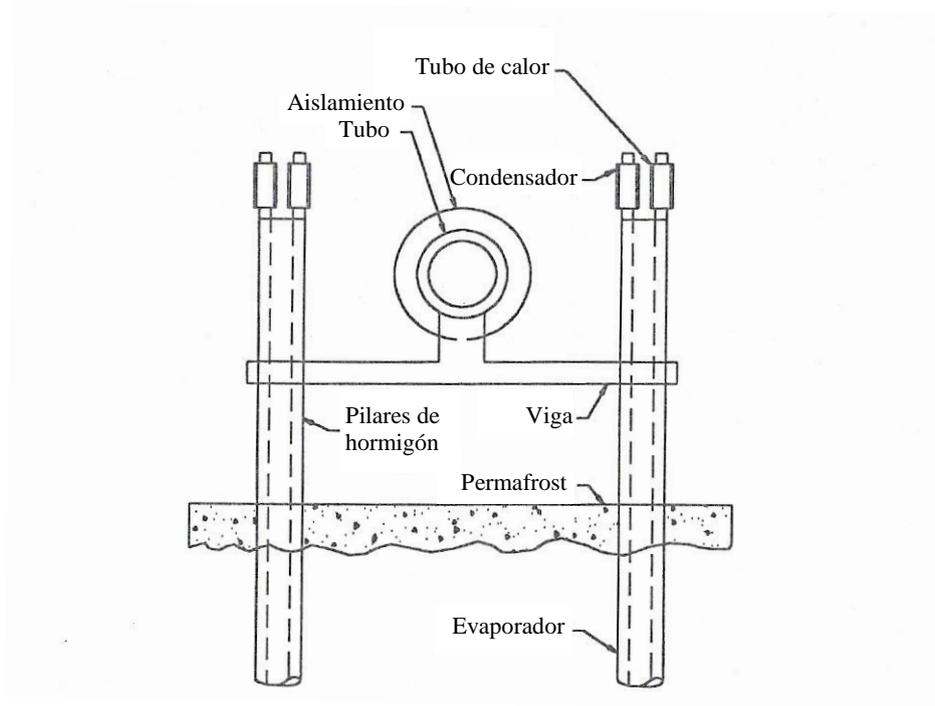


Figura 1.6-4 Aplicación de tubos de calor en la estabilización del permafrost en el apoyo estructural del oleoducto Trans-Alaskan.

2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

Un termosifón, como se ha explicado, es un tubo de calor, cerrado y sin mecha, que se coloca verticalmente y que contiene un fluido en su interior. Se trata de un intercambiador de calor simple en diseño, fiable y sin partes móviles. Respecto de otros sistemas, su objetivo es el de simplificar el bombeo de líquido y de transmisión de calor, evitando el coste y la complejidad de una bomba convencional de líquido. Uno de los aspectos a destacar de este sistema de transmisión de calor basado en el cambio de fase, es la no necesidad de algún tipo de fuente de energía externa para lograr su funcionamiento.

Como se puede intuir, la sustancia contenida en el interior del termosifón es uno de los factores que determina su comportamiento térmico. Dicho parámetro debe valorarse frente a otros, tales como material de construcción del termosifón, tamaño, forma, disposición de las aletas del condensador, etc.

Actualmente, las investigaciones llevadas a cabo en el campo de la transmisión de calor mediante termosifón, tratan de conocer el comportamiento de las distintas sustancias, con el fin de optimizar dicha tecnología para la transferencia de calor. En este sentido, en el Área de Máquinas y Motores Térmicos, perteneciente al Departamento de Ingeniería Mecánica, Energética y de Materiales de la Universidad Pública de Navarra, el profesor titular Don Juan José Aguas Alcalde está llevando a cabo un proyecto de investigación con fluidos de trabajo en termosifones bifásicos de baja y media temperatura. Se está estudiando la importancia que puede tener, en la eficiencia global de los termosifones mencionados, el fluido utilizado.

El presente Proyecto Fin de Carrera (PFC) forma parte de esta investigación. Abarca los ensayos realizados con un prototipo de termosifón cilíndrico bifásico de acero inoxidable, y sigue el camino iniciado por otro PFC sobre un prototipo de termosifón de forma prismática de aluminio. Estos ensayos, tanto con el prototipo cilíndrico como con el prismático, han consistido básicamente en, primero, hacer funcionar al termosifón en unas condiciones estables de trabajo con diferentes fluidos de trabajo, y segundo, medir en estas condiciones de estabilidad el comportamiento del termosifón con los diferentes fluidos de trabajo. De estas mediciones se obtienen las diferencias de comportamiento en el termosifón entre los distintos fluidos de trabajo.

2.1 OBJETIVOS FUNDAMENTALES

Los objetivos fundamentales de este proyecto son tres. Uno, exponer cómo se han llevado a cabo los ensayos mencionados con el prototipo de termosifón cilíndrico, explicando lo que se ha hecho y por qué. Dos, presentar de forma clara los resultados de las mediciones realizadas, haciendo especial énfasis en las diferencias de comportamiento del termosifón con las sustancias ensayadas. Y tres, hacer una comparación de los resultados obtenidos en los ensayos con el prototipo de termosifón cilíndrico y prismático.

2.2 OBJETIVOS SECUNDARIOS

Además de hacer funcionar al termosifón cilíndrico con diferentes fluidos de trabajo, se han realizado ensayos modificando otras variables que gobiernan el rendimiento del prototipo, como la carga, la temperatura de trabajo, la orientación del termosifón o el flujo de calor entrante al termosifón. Por lo tanto, también se van a presentar los resultados de estos ensayos, mostrándose los cambios de rendimiento del prototipo cilíndrico al modificarse las mencionadas variables.

Y finalmente se analizará el comportamiento del termosifón en función de las propiedades termo-físicas del fluido de trabajo, presión y entalpía de vaporización.

3 ESTUDIO DE LAS SUSTANCIAS A ENSAYAR

Se va a comenzar la descripción de los ensayos realizados analizando el elemento objeto de estudio de la investigación, las sustancias o fluidos de trabajo utilizados.

3.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS SUSTANCIAS A ENSAYAR

Los fluidos de trabajo que operan en termosifones deben cumplir una serie de características relacionadas con las personas y el medio ambiente, el propio termosifón y el equipo en el que el termosifón está instalado. Entre ellas se encuentran las siguientes:

Personas y medio ambiente:

- Los fluidos no deben generar ningún tipo de peligro para las personas durante su producción, funcionamiento habitual del termosifón o bien en caso de avería (fuga repentina, fuego, etc.). Por tanto, no deben ser ni nocivos, ni tóxicos, ni corrosivos.
- No deben ser dañinos para el medio ambiente. Por tanto, deben tener un bajo índice ODP (siglas en inglés de potencial de reducción de la capa de ozono), no deben contribuir al efecto invernadero, no deben ser peligrosos para animales o plantas ni producir productos de descomposición con tales efectos. Preferentemente, tendrían que ser sustancias que se produjeran naturalmente para eliminar el riesgo de efectos medioambientales desconocidos.

Termosifón y equipo:

- No deben reaccionar químicamente con el material de que esté construido el termosifón, ya que el gas generado, aunque fuese en cantidades muy pequeñas, dificultaría el funcionamiento del termosifón por obstrucción del condensador.
- Desde un punto de vista operacional, deben ser capaces de soportar el ambiente del equipo sin descomponerse durante un periodo largo de tiempo. No deben ser ni explosivos, ni inflamables.
- No deben ser perjudiciales para el equipo en el que estén instalados. Deben ser compatibles con los materiales del equipo, no reaccionando químicamente con ellos. También hay que tener en cuenta que la corrosión del termosifón puede ser mucho más severa que en otras aplicaciones con condiciones más normales. Esto se debe a que en el interior del termosifón el fluido, muy puro, está en estado de dos fases (líquido-vapor), en una destilación permanente, lo que permite disolver o atacar con mayor facilidad la envolvente del termosifón.

Además, conviene que los fluidos de trabajo sean baratos y fácilmente disponibles. Hay que analizar tanto el precio del fluido en sí como el costo de su puesta en funcionamiento en la instalación.

Reunir todos estos requerimientos en un fluido, desafortunadamente, es imposible, y por lo tanto es necesario llegar a algún tipo de compromiso. La primera preocupación debería ser el riesgo de daño por una fuga, tanto para las personas como para el medio ambiente.

3.2 PROPIEDADES TERMODINÁMICAS Y TERMO-FÍSICAS DE LAS SUSTANCIAS A ENSAYAR

Las sustancias que operan en termosifones, también deben cumplir unas características relacionadas con sus propiedades termodinámicas y termofísicas. Se enumeran a continuación:

- Desde el punto de vista termodinámico la primera etapa consiste en seleccionar el rango de las temperaturas de trabajo. Esto es debido a que el vapor en el interior del termosifón es siempre saturado y su presión no depende más que de la temperatura. Como se dijo en los objetivos del PFC se van a estudiar fluidos para termosifones de baja y media temperatura.
- La presión de vapor saturado no debe ser demasiado débil, inferior a 4 a 10 kPa, pues un vapor muy poco denso no podría transportar el flujo de calor demandado. Y no debe superar la presión de 2 a 4 MPa, a la temperatura máxima de trabajo, sin sobrepasar las presiones máximas de seguridad del depósito del termosifón. Por ello, conviene que el punto de ebullición normal de la sustancia esté próximo a las temperaturas de trabajo.
- La temperatura del punto crítico debe ser mayor que la temperatura máxima de trabajo y el punto triple claramente inferior que la temperatura mínima de trabajo. De esta manera el fluido está siempre en forma bifásica (líquido-vapor).
- Sus prestaciones térmicas deben de ser elevadas. Especialmente el valor de la entalpía de vaporización y el calor específico han de ser altos.
- Pequeña variación de la presión de vapor con la temperatura.
- Las sustancias deben de ser resistentes a sobrecalentamientos accidentales, es decir, no deben descomponerse a una temperatura inferior a la temperatura que puede alcanzar el termosifón.

3.3 SUSTANCIAS SELECCIONADAS

Para los ensayos con el prototipo de termosifón cilíndrico se han seleccionado una serie de sustancias. Estas, cumplen en mayor o menor medida las características arriba mencionadas, siendo fluidos bastante comunes de fácil adquisición y manejo. Además, son fluidos orgánicos no polares (a excepción del agua, que es un fluido inorgánico) de varios grupos funcionales, aplicables en termosifones de media temperatura, es decir, termosifones que funcionan en aplicaciones donde se alcanzan temperaturas medias (por ejemplo en aplicaciones domésticas como frigoríficos, ordenadores...).

En la selección de estas sustancias se han tenido en cuenta dos variables por encima de las demás. Por un lado, el punto de ebullición normal. Esta variable muestra la adecuación del fluido de trabajo a la temperatura de operación de diseño, para que no se alcancen presiones elevadas. Y por otro lado, la entalpía de vaporización (cantidad de energía que el fluido absorbe para cambiar de fase, de líquido a vapor). Cuanto mayor es, más eficiente es el fluido, ya que se

necesita menos cantidad de líquido para intercambiar la misma cantidad de energía en forma de calor.

3.3.1 Mezclas azeotrópicas

Entre las sustancias seleccionadas hay tres mezclas azeotrópicas orgánicas. Un azeótropo o mezcla azeotrópica es una mezcla de dos o más líquidos en una concentración en la cual su composición no puede ser cambiada por medio de una destilación simple. Esto es así porque cuando una mezcla azeotrópica bulle, el vapor originado es de la misma concentración que la mezcla líquida original. Es decir, las mezclas azeotrópicas se comportan como un compuesto puro, como si fuese un solo componente.

La palabra *azeotrope* viene de las palabras griegas ζέειν (hervir) y τρόπος (cambio) que combinadas con el prefijo α- (no) dan un significado conjunto de “sin cambios en la ebullición”. Se han documentado más de 9.000 mezclas azeotrópicas de dos componentes. Y también son conocidas muchos azeótropos de tres o más componentes.

3.3.2 Presentación de las sustancias ensayadas

Se van a presentar, a continuación, las sustancias ensayadas. Se han estudiado doce sustancias puras y tres mezclas azeotrópicas:

- El grupo de sustancias puras está compuesto por los siguientes fluidos:
 - Ocho sustancias orgánicas pertenecientes a diferentes grupos funcionales: tres hidrocarburos saturados, el N-pentano, el N-hexano y el isopentano (metil butano); un hidrocarburo saturado cíclico, el ciclopentano; un alcohol, el metanol; un éter, el dietil éter; un éster, el formiato de metilo; y una cetona, la acetona.
 - Tres refrigerantes orgánicos: un HCFC, el R-141b; un HFC, el R-365-mfc; y un FC, el FC-84 (Perfluoro heptano).
 - Una sustancia inorgánica, el agua.
- Las mezclas azeotrópicas son la acetona-Npentano, el ciclopentano-metanol y el dietil éter-formiato de metilo.

En las siguientes tablas se pueden ver las características y los valores de las propiedades más importantes de las sustancias ensayadas:

Mezcla	Composición en peso	Composición molar	Punto de ebullición
Ciclopentano – Metanol	86 % 14 %	73,73 % 26,27 %	38,8 °C
Dietil éter – Metanoato de metilo	55 % 45 %	60,14 % 39,86 %	28,4 °C
Acetona – N-Pentano	80 % 20 %	76,30 % 23,70 %	32,5 °C

Tabla 3.3-1 Características de las mezclas azeotrópicas ensayadas.

Sustancia	Grupo funcional	Fórmula química	Masa molecular (M) [10 ⁻³ kg/mol]	Densidad del líquido (20 °C) (ρ_l) [kg/m ³]	Densidad del vapor (20 °C) (ρ_v) [kg/m ³]	Presión del vapor (20 °C) (P_v) [bar]	Punto de ebullición [°C]	Entalpía másica de vaporización (25 °C) (h_{IV}) [kJ/kg]	Entalpía molar de vaporización (25 °C) (h_{IV}) [kJ/mol]	Calor específico del líquido (25 °C) (c_{pl}) [J/kgK]	Temperatura crítica (T_c) [K]
Acetona	Cetona	CH ₃ COCH ₃	58,08	791	0,55	0,233	56,5	531	30,87	2168	508
Agua	Inorgánico	H ₂ O	18,02	998,21	0,017	0,0231	100	2441	43,98	4183	647,14
Ciclopentano	Hidrocarburo saturado cíclico	C ₅ H ₁₀	70,13	710	1,97	0,423	49,4	417	29,21	1807	511
Dietil éter	Éter	C ₂ H ₅ OC ₂ H ₅	74,1	710	1,78	0,587	34,6	392	27,16	2331	466,7
FC-84 (Perfluoro heptano)	FC	CF ₃ CF ₂ CF ₂ CF ₂ CF ₂ CF ₃	388,05	1733	1,32	0,083	80,5	92	35,7	1043	475
Formiato de metilo	Éster	HCOOCH ₃	60,05	974	1,57	0,637	31,5	472	28,37	1993	487
Isopentano (Metil butano)	Hidrocarburo saturado	CH ₃ (CH ₃)CHCH ₂ CH ₃	72,1	620	2,27	0,768	27,9	344	24,83	1648	461
Metanol	Alcohol	CH ₃ OH	32,04	791	0,17	0,128	64,7	1168	37,43	2508	513
N-Hexano	Hidrocarburo saturado	C ₆ H ₁₄	86,18	661	0,72	0,1647	68,74	366	31,55	2268	507,5
N-Pentano	Hidrocarburo saturado	C ₅ H ₁₂	72,1	630	1,69	0,573	36,1	383	26,2	2319	469,7
R-141-b	HCFC	CCl ₂ FCH ₃	117,1	1245	3,19	0,65	32,1	224,2	27,62	1083	477,26
R-365-mfc	HFC	CF ₃ CH ₂ CF ₂ CH ₃	148,09	1270	2,86	0,47	40,2	-	-	-	-

Tabla 3.3-2 Grupo funcional, fórmula química y propiedades de las sustancias puras ensayadas.

4 ENSAYOS CON EL TERMOSIFÓN CILÍNDRICO

La investigación con fluidos de trabajo en termosifones y en concreto los ensayos con el prototipo de termosifón cilíndrico se están llevando a cabo en el Laboratorio de Tecnología Energética del Edificio de Talleres y Laboratorios de la Universidad Pública de Navarra.

4.1 MONTAJE EXPERIMENTAL

Para los ensayos con el termosifón cilíndrico se ha preparado un montaje experimental con el prototipo como elemento central (Figura 4.1-1). Este montaje tiene como función básica generar unas condiciones de trabajo estables de un fluido a otro (flujo de calor entrante, cantidad de fluido de trabajo, inclinación del termosifón y temperatura del ambiente en el que se encuentra el termosifón), necesarias para apreciar diferencias en el comportamiento de las diferentes sustancias ensayadas en el prototipo de termosifón. También ha permitido la carga y descarga de los diferentes fluidos de trabajo con los que se ha ensayado, además del vaciado del aire, necesario previo a una carga de fluido de trabajo.

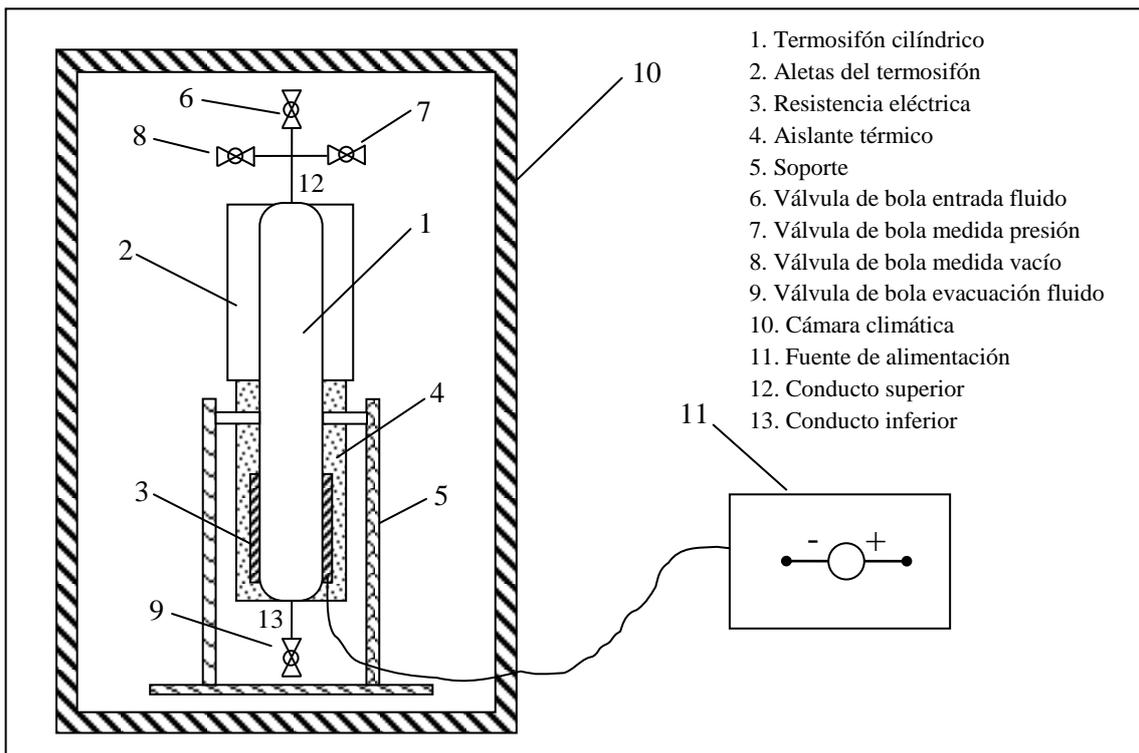


Figura 4.1-1 Diagrama esquemático del montaje experimental. Una resistencia eléctrica (3) conectada a una fuente de alimentación (11) que proporciona una tensión constante en el tiempo permite una entrada de calor constante por la zona inferior o evaporador del prototipo (el aislante térmico (4) obliga a que el calor generado sea igual al calor entrante). La temperatura de trabajo del termosifón la gobierna la cámara climática (10), que genera una temperatura y humedad constante en su interior. El giro del termosifón respecto a un eje, además de la sujeción, lo proporciona el soporte (5). La carga y descarga del fluido de trabajo, se realiza por medio de dos conductos, uno en cada extremo del termosifón; siendo la carga por el conducto superior (12) a través de la válvula de entrada de fluido (6), y la descarga por el conducto inferior (13) a través de la válvula de evacuación de fluido (9). La evacuación del aire previo a una carga de fluido de trabajo se efectúa por medio de la válvula de entrada de fluido (6). Por el conducto superior (12) también se hace la medición de presión y vacío del interior del termosifón, por medio de las válvulas de presión (7) y de vacío (8).

4.1.1 Componentes del montaje experimental

A continuación se va a describir con más detalle cada elemento del montaje experimental:

4.1.1.1 Prototipo de termosifón cilíndrico

El prototipo de termosifón usado en estos ensayos se puede describir como un tubo de acero inoxidable AISI 304, cerrado en sus dos extremos por sendas tapas en forma de cúpula del mismo material. Las dimensiones del tubo son 610 mm de longitud, 63,5 mm de diámetro exterior y 1,5 mm de espesor. Además lleva soldadas longitudinalmente una serie de aletas en la zona superior (o condensador), las cuales favorecen la transmisión del calor. Son 24 aletas de acero inoxidable AISI 304, con 250 mm de longitud, 30 mm de anchura y 1,5 mm de espesor (Figura 4.1-2).

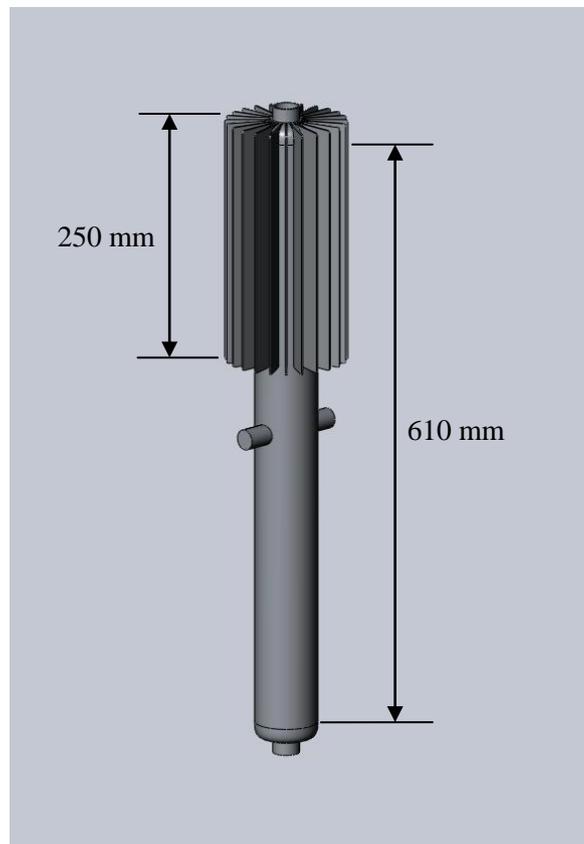


Figura 4.1-2 Dibujo en 3D del prototipo de termosifón. Se puede apreciar la forma tubular del prototipo, cerrado por las dos tapas en forma de cúpula. En las dos tapas se ven dos orificios, a los cuales están unidas las válvulas de bola indicadas en la Figura 4.1-1. También se aprecian las 24 aletas en la zona del condensador. Además, en el medio del tubo hay soldados dos cilindros del mismo material del termosifón que permiten apoyarse en el soporte (Figura 4.1-1) y formar el eje por el cual puede girar el termosifón.

Cabe destacar dos características del prototipo de termosifón debidas a su forma y material del que está construido. Por un lado, la forma cilíndrica del prototipo, además del material, permite alcanzar en su interior presiones de unos 20 bares; admitiendo ensayos a altas presiones de trabajo. Y la otra característica la ofrece el material del que está compuesto el termosifón, que al ser de acero inoxidable es muy resistente a la corrosión; pudiendo de esta manera ensayar con muchos tipos de fluidos de trabajo.

En el montaje experimental, al prototipo de termosifón se le han acoplado una resistencia eléctrica y un aislante térmico (Figura 4.1-3). De esta manera en el prototipo se distinguen tres zonas:

- El evaporador, definido por la parte cubierta por la resistencia eléctrica. Al aplicarle tensión, la resistencia eléctrica genera calor el cual provoca la ebullición del fluido del interior del prototipo.
- El condensador, en la parte superior, donde están las aletas. El vapor generado en el evaporador, sube por el tubo a la zona de las aletas, donde la temperatura es inferior a la temperatura de saturación del fluido, y condensa iniciando la vuelta al evaporador.
- La zona adiabática, en la parte intermedia del termosifón, desde el final de la resistencia eléctrica hasta el comienzo de las aletas. En esta zona no hay intercambio de energía del termosifón con el exterior, ya que se encuentra el aislante térmico. Además, se cruzan las dos corrientes de vapor y condensado, la primera subiendo y la segunda bajando.

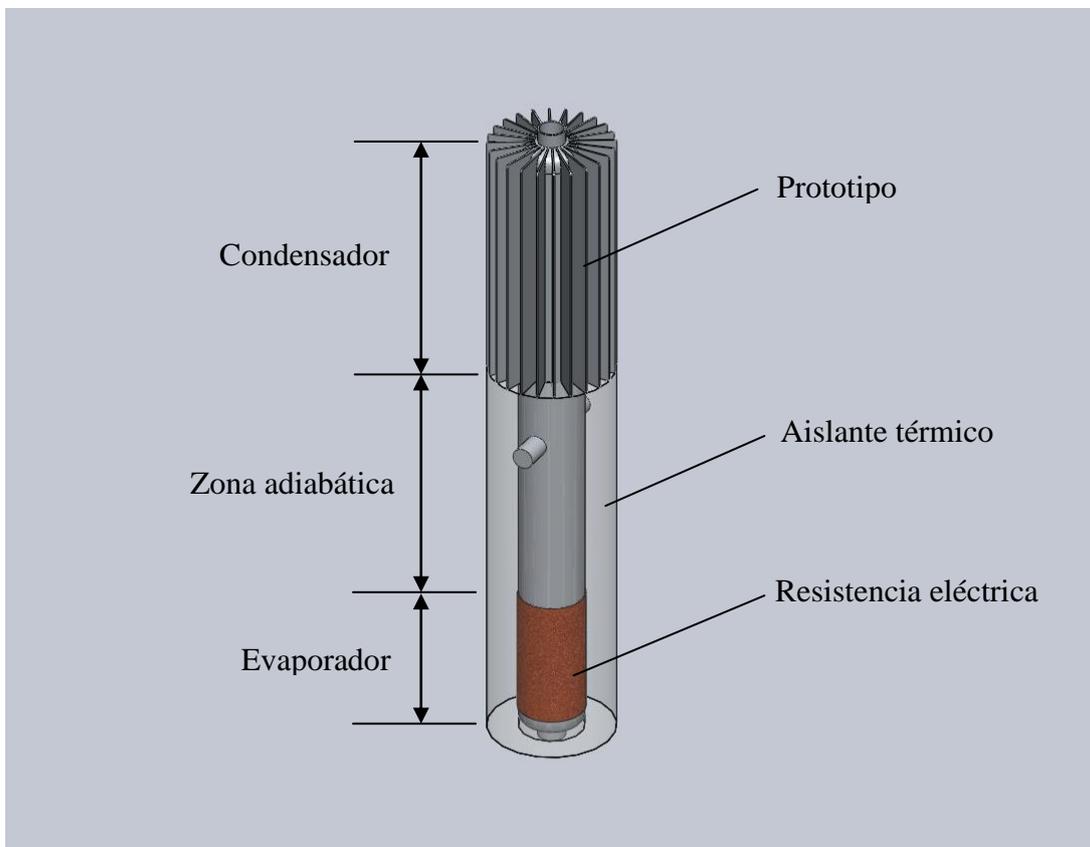


Figura 4.1-3 Dibujo en 3D del prototipo con la resistencia eléctrica y el aislante térmico. El aislante se ha dibujado transparente para que pueda verse la resistencia eléctrica.

4.1.1.2 Resistencia eléctrica

Resistencia eléctrica que proporciona el flujo de calor, por el evaporador, al prototipo de termosifón. Es de la marca WATLOW, modelo E 01 250 1500. Sus características son: potencia nominal 150 W, tensión máxima 24 V e intensidad máxima 10 A. Es de forma plana y flexible, por lo que se le ha podido dar la forma tubular del termosifón. Sus dimensiones son, 150 mm de ancho por 125 mm de alto; por lo tanto no cubre toda la circunferencia del tubo del prototipo

(Figura 4.2-2) y llega hasta los primeros 125 mm de la longitud del prototipo en la parte inferior.



Figura 4.1-4 Resistencia eléctrica.

Una característica importante de esta resistencia eléctrica es la pequeña variación en su valor resistivo frente al cambio de temperatura (mucho menor que la variación del cobre). Esta propiedad es necesaria para que la resistencia aporte una potencia calorífica constante en el tiempo durante los ensayos, indispensable para generar unas condiciones de trabajo del termosifón estables. Durante los ensayos se pasa por varias temperaturas de trabajo, por lo tanto, con un valor resistivo constante, simplemente con aplicar una tensión constante a la resistencia eléctrica, esta ofrecerá una potencia constante ($P=V \times I$, aplicando la Ley de Ohm, $P=V^2/R$).

4.1.1.3 Aislante térmico

El aislante térmico cubre el prototipo desde el comienzo del tubo por la parte inferior hasta el comienzo de las aletas. De la marca ISOVER, tipo Armaflex AF, consiste en una espuma elastómera a base de caucho sintético flexible y es de diámetro interior 60 mm y espesor 20 mm. Sus funciones son dos: evitar el escape del calor generado por la resistencia térmica en el evaporador (consiguiéndose que todo el calor pase al termosifón) y generará en la parte intermedia del prototipo una zona adiabática.



Figura 4.1-5 Aislante térmico.

4.1.1.4 Válvula de bola

Las cuatro válvulas utilizadas en el montaje experimental (válvula de entrada de fluido, de evacuación de fluido, de medida de presión y de medida de vacío) son del mismo tipo: válvulas de bola, temperatura máxima 150 °C, de la marca FILTUBE.



Figura 4.1-6 Válvula de bola.

4.1.1.5 Fuente de alimentación

La fuente de alimentación es de la marca WAYNE KERR Electronics, el modelo AP10090 A. Sus características son: potencia máxima de 3 kW, tensión de 0 a 100 V e intensidad de 0 a 90 amperios. La fuente de alimentación ha proporcionado una tensión constante a la entrada de la resistencia eléctrica del montaje. Junto con el valor resistivo independiente de la temperatura de esta última, han permitido una entrada de calor constante en el tiempo al prototipo de termosifón.



Figura 4.1-7 Fuente de alimentación. Encima de la fuente de alimentación se puede apreciar el montaje eléctrico que ha permitido la medida de tensión e intensidad (ver Figura 4.2-4).

4.1.1.6 Cámara climática

La cámara climática utilizada es de la marca CLIMATS, modelo Spirale, con las siguientes características: capacidad de recinto de ensayo de 1,44 m³, rango de temperaturas de -60 °C a +180 °C y rango de humedad del 10% al 90%. La cámara climática ha proporcionado unas condiciones ambientales constantes, de humedad y temperatura en su interior. De esta manera a permitido trabajar al prototipo de termosifón en unas condiciones ambientales estables.



Figura 4.1-8 Cámara climática

4.2 TOMA DE MEDIDAS

Al realizar los ensayos, además de generar unas condiciones de trabajo determinadas, se han medido una serie de parámetros. Se ha medido la temperatura de varios puntos del prototipo de termosifón, la presión del interior del mismo, además de la tensión e intensidad proporcionada por la fuente de tensión. Estas medidas han tenido por objeto enseñar el estado del ensayo que se estuviera llevando a cabo, además de permitir calcular el rendimiento del termosifón, como se verá más adelante.

Todas estas medidas se han realizado con una serie de sondas que se presentan a continuación. Las sondas, a su vez, han estado conectadas a un registrador de datos (de la marca AMR, modelo Almemo 5590) el cual ha leído las medidas de las sondas en tiempo real. Y estas medidas han quedado registradas a intervalos de dos minutos en un PC por medio de un programa controlador de datos (de nombre Data Control).

4.2.1 Medida de temperatura

Para la medida de la temperatura se han utilizado sondas de temperatura de clase termopar níquel-cromo, tipo K. Han permitido una precisión de medida de la temperatura de décima de grado. Estas, se han puesto en contacto a la pared del termosifón, por la parte exterior, mediante cinta adhesiva. Una pasta conductora, aplicada entre la pared del termosifón y la cinta adhesiva, ha evitado la aparición de aire en el entorno del termopar que falseara la medida.

4.2.1.1 *Sondas de temperatura*

Se han colocado una serie de sondas de temperatura en diversos puntos que nos permitirán calcular el rendimiento del prototipo en su funcionamiento. En la Figura 4.2-1 se aprecian las

posiciones de las sondas en el prototipo de termosifón. Además se ha colocado otra sonda de temperatura en la cámara climática.

A estas sondas, según la posición que han ocupado, se les ha dado un nombre:

- Sonda de temperatura de la resistencia “ T_r ”: posición “1” de la Figura 4.2-1.
- Sonda de temperatura del depósito inferior del termosifón (zona inferior del interior del termosifón) “ $T_{dep.inf.}$ ”: posición “2” de la Figura 4.2-1.
- Sonda de temperatura del depósito superior del termosifón (zona superior del interior del termosifón) “ $T_{dep.sup.}$ ”: posición “3” de la Figura 4.2-1.
- Sonda de temperatura del interior de la cámara climática o del ambiente “ $T_{amb.}$ ”: situada en el interior de la cámara climática.

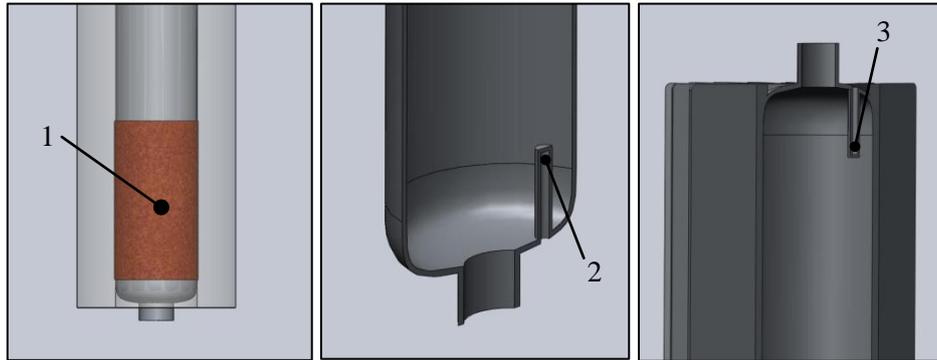


Figura 4.2-1 Posición de las sondas en el termosifón. La sonda de la posición “1” va colocada entre el termosifón y el prototipo, midiendo la temperatura exterior de la zona del evaporador del termosifón. Las sondas de las posiciones “2” y “3” están alojadas en sendas envolturas que se adentran 2 cm en el interior del prototipo. Estas envolturas son de menor espesor que la pared del termosifón, y por lo tanto las sondas ahí alojadas dan una medida bastante cercana a la temperatura del interior del termosifón, en la zona del evaporador y condensador.

4.2.1.2 Sondas de temperatura de control

Durante los ensayos se han medido la temperatura de otros puntos del termosifón con objeto de controlar la marcha del ensayo; pero estas medidas no se han considerado a la hora de hacer los cálculos del rendimiento del termosifón. En la Figura 4.2-2 se señalan las posiciones de estas sondas:

- Posición 1: Esta sonda ha medido la temperatura de la pared del prototipo en el evaporador, en la zona que no está cubierta por la resistencia eléctrica. Esta medida de temperatura ha dado valores iguales o un poco por encima de la medida de la sonda “ $T_{dep.inf.}$ ”.
- Posición 2: Esta sonda ha medido la temperatura de la pared del termosifón en la zona adiabática. Esta medida ha estado normalmente en valores de la sonda $T_{dep.sup.}$.
- Posiciones 3, 4, y 5: Estas tres sondas miden la distribución de temperaturas en una generatriz del condensador. También se ha medido esta distribución de temperaturas en otras dos generatrices. Estas medidas han mostrado cómo el condensador está a mayor temperatura en la parte alta, y va bajando de temperatura según se va hacia la parte baja. También se ha observado que a una misma altura no se alcanzan las mismas temperaturas en el perímetro del condensador; las tres sondas colocadas a la misma altura en las tres generatrices no daban la misma medida de temperatura. Esto quiere

decir que no se han conseguido unas condiciones simétricas en el funcionamiento del termosifón en los ensayos. Esto puede ser debido a que en el interior de la cámara climática hay una pequeña corriente de aire que enfría en mayor medida la parte del condensador expuesta a esta corriente, o también a que la resistencia eléctrica en el evaporador no cubre totalmente el perímetro del termosifón, rompiendo de esta manera las condiciones de simetría.

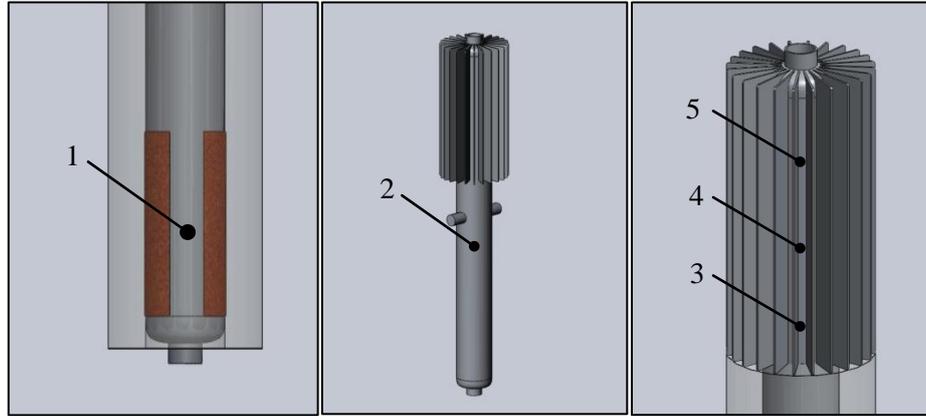


Figura 4.2-2 Posición de las sondas de temperatura de control. La sonda de la posición “1” está colocada en la zona del evaporador que no está cubierta por la resistencia eléctrica. La sonda de la posición 2 está colocada en la zona adiabática del termosifón, hacia la mitad de la longitud del tubo. En las posiciones “3”, “4” y “5” van fijadas tres sondas en una generatriz de la zona del condensador del termosifón (se han colocado otras 6 sondas en dos generatrices más del condensador, formando en total tres generatrices separadas 120° entre sí).

4.2.2 Medida de tensión e intensidad

La potencia que transmite el prototipo de termosifón durante los ensayos es otro de los parámetros que junto a los definidos en la sección “4.2.1.1 Sondas de temperatura” se utilizarán para calcular el rendimiento del termosifón.

Se ha supuesto que todo el calor generado por la resistencia eléctrica en el evaporador del termosifón se transmite al prototipo, fluye por su interior y finalmente sale por el condensador. Esta hipótesis no es del todo cierta, ya que, parte del calor se escapa a través del aislante térmico y otros puntos, como se puede ver en la Figura 4.2-3, pero se ha considerado pequeña en comparación con el calor saliente por el condensador. Por lo tanto, se ha medido la tensión e intensidad que aporta la fuente de alimentación y se ha considerado que es la potencia que se transmite por el interior del termosifón.

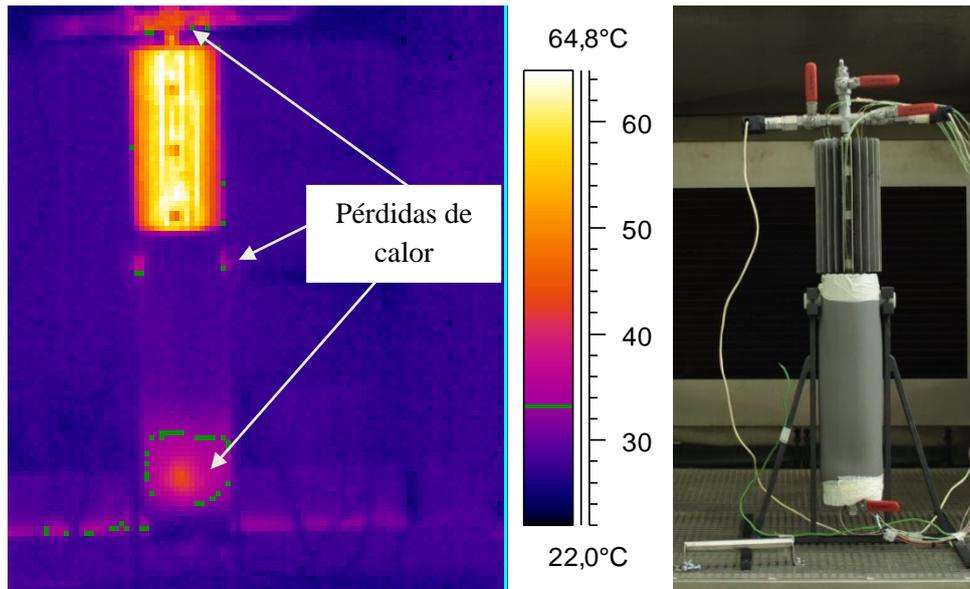


Figura 4.2-3 Termografía y fotografía del prototipo de termosifón. En la termografía se ve al termosifón en funcionamiento, apareciendo las zonas más calientes con colores rojizos y amarillos. La zona más caliente es el condensador, por donde se evacua el calor que se introduce por el evaporador. De las tres zonas que se indican en la termografía, la inferior muestra el calentamiento en la posición donde está situada la resistencia eléctrica, la intermedia indica el lugar donde el prototipo se apoya en el soporte y el superior señala al conducto superior del termosifón.

La medición de la tensión e intensidad de la fuente de alimentación se ha realizado mediante un montaje eléctrico a la salida de la fuente de alimentación (Figura 4.2-4). Se han usado dos sondas, una de tensión y otra de intensidad.

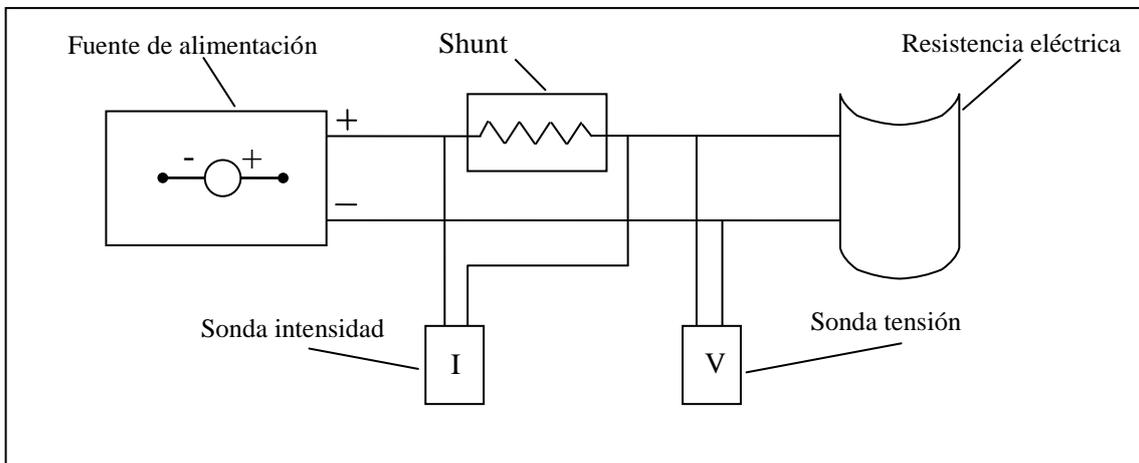


Figura 4.2-4 Montaje eléctrico para la medida de la tensión e intensidad. Las sondas de tensión e intensidad se han conectado a un shunt de medida de tensión e intensidad.

4.2.3 Medida de presión

En el caso de la presión se han montado dos sensores: uno de presión manométrica y otro de vacío. El sensor de presión tiene una precisión de mbar. Ambos sensores se han conectado al conducto superior del montaje experimental por medio de sondas válvulas de bola; para poder aislarlas en caso de presiones altas en el interior del prototipo. Con el sensor de presión manométrica, se ha controlado la presión del interior del termosifón durante los ensayos.

Mientras que con el sensor de presión de vacío se ha medido el vacío alcanzado en el vaciado de aire previo a las cargas de fluido de trabajo (se explica en el apartado que viene a continuación, 4.3 MÉTODO EXPERIMENTAL).

La medida de la presión durante los ensayos, por medio de la sonda de presión manométrica, ha permitido tres cosas:

- Controlar la presión del interior del termosifón para impedir que subiera hasta valores de riesgo.
- Controlar que no entrase aire en el termosifón durante los ensayos: La medida de la presión interior ha permitido calcular la temperatura interior del termosifón mediante la Ecuación de Antoine (ecuación que relaciona la presión de vapor de sustancias puras con su temperatura), y se ha comprobado, durante el transcurso de los ensayos, que esta temperatura estuviese dentro del margen de temperatura dado por las sondas $T_{dep.inf.}$ y $T_{dep.sup.}$. Una eventual entrada de aire daría como resultado un incremento de la presión en el interior del termosifón, falseando por consiguiente el cálculo de la temperatura por medio de la ecuación de Antoine, disparándose por encima del margen mencionado.
- Conocer la presión del interior del termosifón durante los ensayos. De esta manera, se podrá ver la influencia de la presión interior en el comportamiento del prototipo de termosifón.

4.3 MÉTODO EXPERIMENTAL

El procedimiento seguido ha consistido en hacer vacío, extrayendo el aire del interior del prototipo de termosifón, antes de la carga con un fluido de trabajo (el vacío se ha medido con la sonda de vacío). Si después de la carga quedaba algo de aire en el termosifón se percibía con facilidad, ya que, la temperatura calculada por Antoine (a partir de la medida de presión de la sonda de presión) quedaba por encima del intervalo de temperaturas $T_{dep.inf.} - T_{dep.sup.}$. En tal caso se hacía una segunda extracción. El vacío, y las a veces necesarias segundas extracciones, se han conseguido aspirando por la válvula de entrada de fluido del conducto superior (ver Figura 4.1-1) con una bomba de vacío. La evacuación del aire existente en el interior del termosifón es necesaria por dos motivos:

- La existencia de gases no condensables en el interior de un termosifón dificulta la ebullición del fluido de trabajo, ya que aumentan la presión en el interior por encima de la presión de saturación.
- Además, los gases no condensables pueden acumularse en la zona del condensador, disminuyendo la superficie de transmisión del calor y por lo tanto la resistencia térmica de esta zona.

La carga de fluido se ha realizado por la válvula de entrada de fluido del conducto superior (ver Figura 4.1-1). Se ha usado una bomba de carga (ver Figura 4.3-1) cuyo depósito estaba nivelado. Para saber con exactitud cuanta cantidad de sustancia se introducía, se ha pesado en una balanza de precisión la bomba de carga junto con el fluido, antes y después de la carga. La resta de estos dos pesos es la cantidad de sustancia introducida.

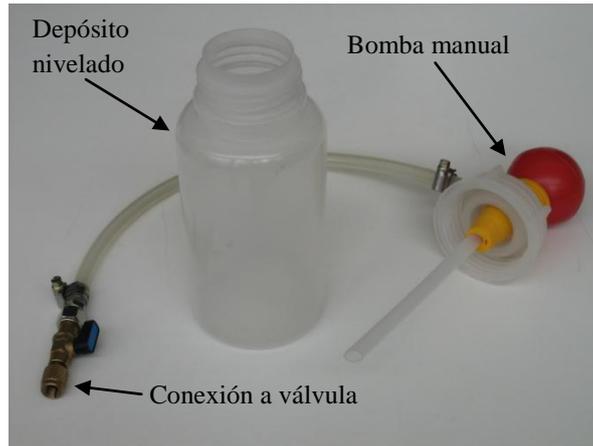


Figura 4.3-1 Bomba de carga.

Con cada fluido de trabajo se ha realizado más de una carga. Se ha comenzado con cargas del 50% del volumen total del evaporador del prototipo, para luego continuar con cargas del 70% y finalizar con cargas del 90%. Las cargas que han seguido a la inicial, han añadido fluido de trabajo al ya existente en cargas anteriores en el termosifón.

En un principio se hicieron cargas al 40%, 60% y 80% para algunas sustancias, pero se apreció que la carga del 40% resultaba ser excesivamente baja (la poca cantidad de fluido no conseguía transportar bien el flujo de calor entrante por el evaporador alcanzándose altas temperaturas en la resistencia eléctrica), y se optó por subir la cantidad de carga. También se probó con cargas superiores al 90%, en concreto con cargas del 125% y 150%, pero no se percibieron mejoras en la resistencia térmica global del prototipo.

El procedimiento de las primeras cargas (50%) han sido como se ha acaba de explicar más arriba. Para las segundas (70%) y terceras cargas (90%) el procedimiento seguido a consistido en comprobar que la presión del fluido en el interior del termosifón fuera menor que la atmosférica, y así poder añadir la cantidad de fluido necesaria con la bomba de carga.

4.3.1 Condiciones de trabajo

Una vez cargado el termosifón de forma adecuada con una cantidad de fluido de trabajo, los ensayos han consistido en hacer funcionar al termosifón en unas condiciones de trabajo. Estas condiciones han consistido en un flujo de calor por el evaporador, una inclinación del termosifón, y unas determinadas condiciones ambientales.

Prácticamente la totalidad de los ensayos se han hecho con un flujo de calor entrante de 150 W. Aunque para los fluidos de trabajo R-141b y n-hexano se han llevado a cabo ensayos con flujos de 75 W, 100 W, 125 W, 175 W y 200 W, con objeto de ver las diferencias de comportamiento del termosifón al variar la entrada de calor por el evaporador.

En lo relativo a la inclinación del termosifón durante los ensayos, estos se han hecho con el termosifón en posición vertical. Al igual que con el flujo de calor entrante, se ha variado la inclinación para los ensayos con los fluidos de trabajo R-141b y n-hexano; se han realizado ensayos con el eje del termosifón a 80° y 60° respecto del plano horizontal.

Y finalmente, se ha hecho trabajar al termosifón en diferentes condiciones ambientales, logradas por medio de la cámara climática presentada en la sección 4.1.1.6. Se ha seguido un ciclo de trabajo según los criterios de la norma europea EN 28187 “Household refrigerating appliances. Refrigerators-freezers. Characteristics and test methods (ISO 8187:1991)”, el cual determina unas temperaturas y humedades relativas que se muestran en la Figura 4.3-2. Este ciclo de trabajo se emplea para ensayar la durabilidad de los circuitos de refrigeración de los frigoríficos y se lleva empleando en los ensayos del Área de Máquinas y Motores Térmicos de la U.P.Na desde que se empezó a investigar con refrigeradores domésticos empleando la termoelectricidad y los termosifones con cambio de fase.

Se ha realizado una variación del ciclo original, moviendo el tramo de 10 °C, originalmente al principio del ciclo, a la parte final. Con esto, se ha conseguido reducir el tiempo utilizado para hacer las segundas y terceras cargas de fluido de trabajo: acabando el ciclo en la temperatura de 43 °C, la presión de saturación de las sustancias en el interior del termosifón eran superiores a la presión atmosférica, necesitando un tiempo de enfriamiento de la sustancia hasta bajar a una presión inferior a la atmosférica y así poder cargar.

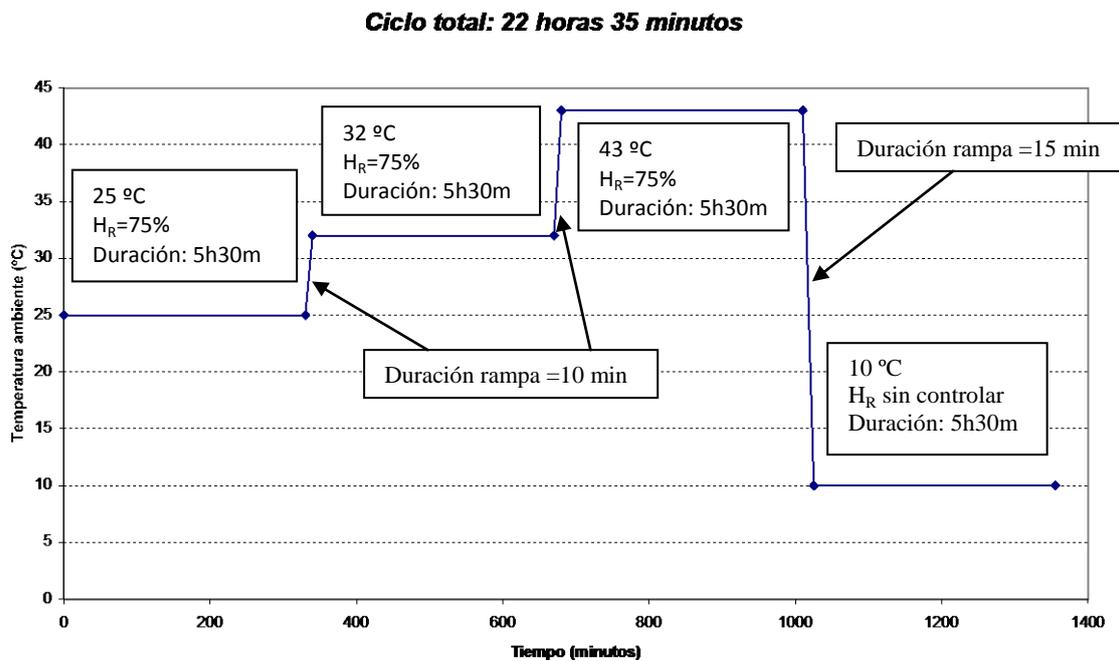


Figura 4.3-2 Ciclo de trabajo. La duración del ciclo de trabajo no llega a las 24 horas para tener tiempo de hacer la siguiente carga. Además, el ciclo es de duración tan prolongada para que en cada tramo el termosifón llegue al estado estacionario.

4.4 ENSAYOS REALIZADOS. CARGAS DE FLUIDO DE TRABAJO

Cada ensayo ha consistido en cargar el termosifón con una determinada cantidad de fluido de trabajo y ponerlo a funcionar a un determinado flujo de calor entrante y una determinada inclinación siguiendo el ciclo de trabajo arriba explicado. A continuación se listan todos los ensayos realizados. Para cada ensayo se muestra el volumen teórico de carga de fluido de trabajo, el volumen cargado realmente y la desviación del volumen cargado respecto el volumen teórico. Se aprecia que esta desviación del volumen no es mayor que el $\pm 5\%$, pudiéndose

admitir que, a efectos prácticos, los ensayos se han efectuado con cargas iguales al volumen teórico (esto es importante a la hora de comparar unos ensayos con otros).

Para el caso del fluido de trabajo agua, se han repetido los ensayos realizados. De esta manera se podrá ver la repetitividad de los ensayos, ya que se han mantenido las condiciones de trabajo constantes.

Sustancia	Carga	Flujo de calor (W)	Inclinación	Volumen teórico (cm ³)	Volumen real (cm ³)	Desviación volumen (%)
Acetona	50%	150	Vertical	219	230	5,22
	70%	150	Vertical	291	303	4,43
	90%	150	Vertical	362	353	-2,67
Acetona- NPentano	50%	150	Vertical	219	219	0,09
	70%	150	Vertical	291	295	1,64
	90%	150	Vertical	362	367	1,24
Agua	50%	150	Vertical	219	232	6,09
	70%	150	Vertical	291	310	6,70
	90%	150	Vertical	362	371	2,37
Agua (rep.)	50%	150	Vertical	219	216	-1,21
	70%	150	Vertical	291	295	1,50
	90%	150	Vertical	362	372	2,77
Ciclopentano	50%	150	Vertical	219	219	0,05
	70%	150	Vertical	291	301	3,49
	90%	150	Vertical	362	374	3,33
Ciclopentano- Metanol	50%	150	Vertical	219	231	5,81
	70%	150	Vertical	291	291	0,23
	90%	150	Vertical	362	375	3,47
Dietil Eter	50%	150	Vertical	219	221	1,05
	70%	150	Vertical	291	292	0,61
	90%	150	Vertical	362	364	0,34
Dietil Eter- Formiato de Metilo	50%	150	Vertical	219	216	-1,05
	70%	150	Vertical	291	296	1,85
	90%	150	Vertical	362	359	-0,92
FC-84	50%	150	Vertical	219	228	4,22
	70%	150	Vertical	291	297	2,16
	90%	150	Vertical	362	369	1,70
Formiato de Metilo	50%	150	Vertical	219	227	3,76
	70%	150	Vertical	291	297	2,12
Isopentano	50%	150	Vertical	219	224	2,23
	70%	150	Vertical	291	302	4,09
	90%	150	Vertical	362	353	-2,53
Metanol	50%	150	Vertical	219	220	0,47
	70%	150	Vertical	291	287	-1,35
	90%	150	Vertical	362	367	1,38

Tabla 4.4-1 Listado de ensayos realizados con el prototipo de termosifón cilíndrico.

Sustancia	Carga	Flujo de calor (W)	Inclinación	Volumen teórico (cm ³)	Volumen real (cm ³)	Desviación volumen (%)
n-Hexano	50%	150	Vertical	219	225	3,08
	70%	150	Vertical	291	300	3,10
	90%	150	Vertical	362	360	-0,65
	90%	75	Vertical	362	360	-0,65
	90%	100	Vertical	362	360	-0,65
	90%	125	Vertical	362	360	-0,65
	90%	175	Vertical	362	360	-0,65
	90%	200	Vertical	362	360	-0,65
	90%	150	80°	362	360	-0,65
	90%	150	60°	362	360	-0,65
n-Pentano	50%	150	Vertical	219	222	1,54
	70%	150	Vertical	291	291	0,07
	90%	150	Vertical	362	372	2,70
R-141b	50%	150	Vertical	219	223	1,79
	70%	150	Vertical	291	311	7,14
	90%	150	Vertical	362	357	-1,42
	90%	75	Vertical	362	369	1,69
	90%	100	Vertical	362	369	1,69
	90%	125	Vertical	362	369	1,69
	90%	175	Vertical	362	369	1,69
	90%	200	Vertical	362	369	1,69
	90%	150	80°	362	369	1,69
	90%	150	60°	362	369	1,69
R-365	50%	150	Vertical	219	216	-1,27
	70%	150	Vertical	291	288	-0,78
	90%	150	Vertical	362	368	1,50

Tabla 4.4-2 Listado de ensayos realizados con el prototipo de termosifón cilíndrico (continuación).

5 ENSAYOS CON EL TERMOSIFÓN PRISMÁTICO

Previamente a la realización del presente proyecto se investigó el comportamiento de varias sustancias de las estudiadas en el presente proyecto, con un termosifón de forma prismática. A continuación se procede a describir cómo fueron estos ensayos.

5.1 SUSTANCIAS ENSAYADAS

Para los ensayos realizados con el termosifón prismático no se utilizaron todos los fluidos de trabajo ensayados con el termosifón cilíndrico. Se ensayaron tres sustancias puras y tres mezclas azeotrópicas (las mezclas azeotrópicas sí fueron todas las ensayadas con el termosifón cilíndrico):

- Las sustancias puras ensayadas fueron las siguientes: el dietil éter (grupo funcional: éter), el N-pentano (grupo funcional: hidrocarburo saturado) y el R-141b (refrigerante orgánico HCFC).
- Las mezclas azeotrópicas ensayadas fueron: la acetona-Npentano, el ciclopentano-metanol y el dietil éter-formiato de metilo.

5.2 DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO

Para este proyecto se utilizó un prototipo de termosifón prismático. Estaba fabricado en aluminio, dada su buena relación entre características térmicas, constructivas y de precio. Se trataba de un recipiente cuyo volumen era un prisma recto cerrado con dos caras opuestas mucho mayores que el resto. Con el objeto de poder hacer funcionar al termosifón con distintos fluidos de trabajo, el prototipo tenía un orificio en la parte superior por donde era posible introducir el fluido de trabajo, y por otro en la parte inferior se permitía la evacuación. Para hacer funcionar al termosifón y poder apreciar el comportamiento de las diferentes sustancias, se acopló una pastilla Peltier como fuente artificial de calor en la parte inferior de una de las dos caras mayores (evaporador del termosifón), orientada de tal manera que la cara caliente estaba en contacto con el termosifón (Figura 5.2-1). En la otra cara mayor del prisma, una serie de aletas verticales soldadas por la parte exterior, permitían la evacuación del calor introducido por la pastilla Peltier (condensador del termosifón). Además, un aislante térmico que tapaba todas las caras del prisma a excepción de la cara donde estaban las aletas verticales, evitaba fugas de calor por esas caras (Figura 5.2-2).

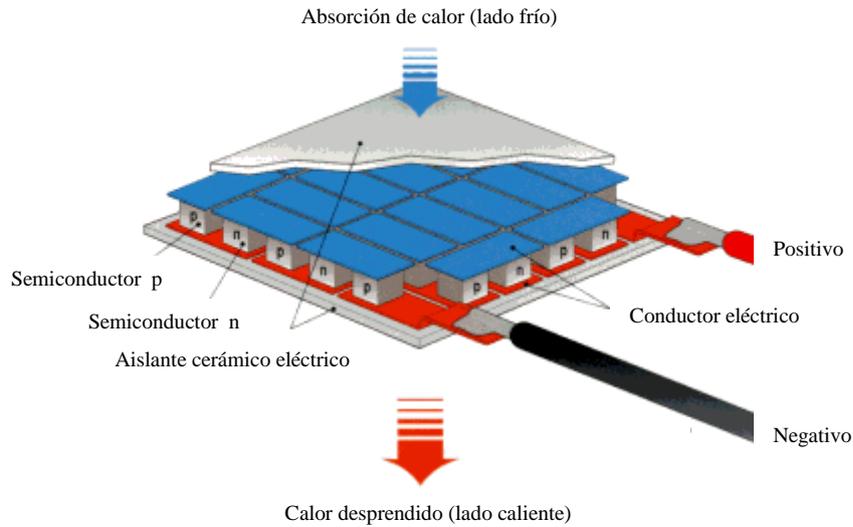


Figura 5.2-1 Esquema de una pastilla Peltier. Al introducir una corriente eléctrica por los conductores eléctricos, la pastilla actúa como una bomba de calor gracias al efecto Peltier; una de las caras se pone a alta temperatura y la otra a baja temperatura. La cara de alta temperatura se posiciona pegada a la zona del evaporador del prototipo de termosifón prismático.

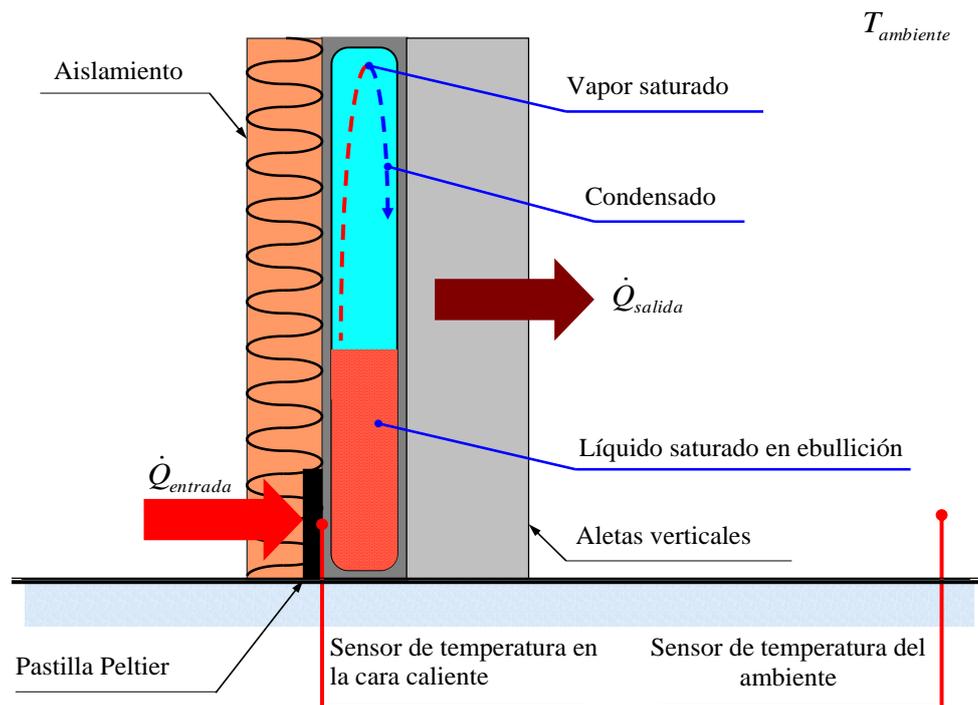


Figura 5.2-2 Esquema y principio de funcionamiento del prototipo. La alta temperatura de la pastilla Peltier genera un flujo de calor de entrada que a su vez hace que el líquido saturado que hay en la parte inferior del termosifón se vaporice. El vapor generado sube a la parte superior del termosifón y debido a la baja temperatura que hay en la cara donde están situadas las aletas, cede su calor latente y se condensa. El condensado baja por esa misma cara y vuelve al pozo de líquido saturado de la parte inferior, completándose de esa manera el ciclo vaporización-condensación que realiza el fluido de trabajo en interior del termosifón.

5.2.1 Dimensiones, características y acoplamientos

Las dimensiones exteriores del termosifón prismático eran: 400 mm de altura, 180 mm de anchura y 20 mm de espesor. Como ya se ha dicho, dos de las seis caras del prisma eran mucho más grandes que el resto. Una de ellas era el dissipador, compuesto por 32 aletas rectangulares de aluminio (como el propio termosifón), colocadas en posición vertical, de 40 mm de altura y una separación entre ellas de 4 mm (Figura 5.2-3). El espesor de la cara del dissipador era de 5 mm y el de la cara opuesta de 3 mm, por lo que el espacio interno era de 12 mm. Las demás caras tenían 2 mm de espesor.

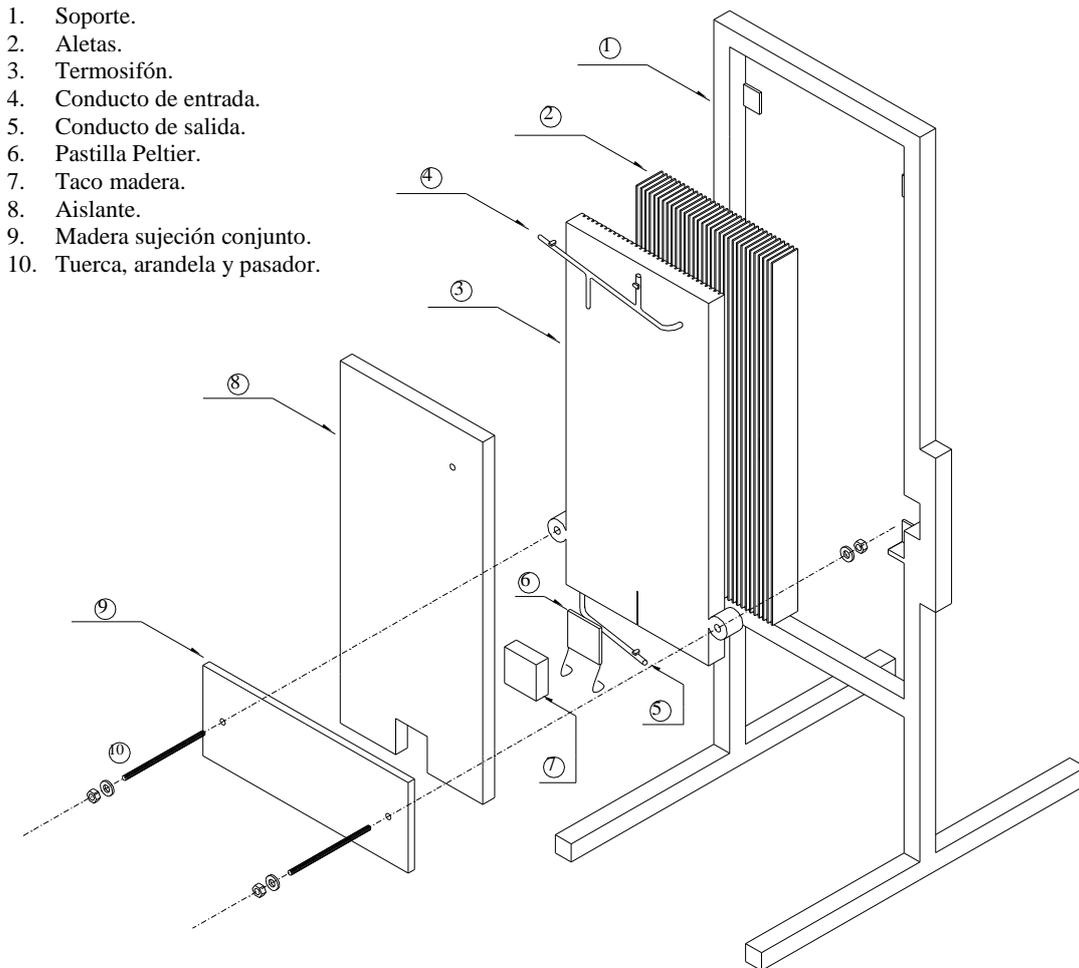


Figura 5.2-3 Montaje del termosifón de trabajo. La forma de sujeción de la pastilla Peltier al termosifón se realizó mediante un taco de madera (7), una madera larga (9) y dos pasadores de nylon con dos tuercas cada uno (10). La sujeción del termosifón al soporte (1) se llevó a cabo mediante unas abrazaderas con forma de U (no aparecen en el dibujo); un extremo de estas abrazaderas contactaba con la pieza larga de madera (9) y el otro extremo con el soporte (con este soporte, el termosifón queda permanentemente en posición vertical, manteniendo constante la inclinación que es una de las variables que influyen en el rendimiento de transmisión del calor del termosifón).

En la parte superior del termosifón se situó una rampa de llenado del fluido, con una pendiente suave que lo favorecía. A esta tubería se le acopló un sensor para medir la presión del interior del termosifón y dos válvulas que permitían realizar tanto el llenado del termosifón con fluido de trabajo como el vacío del aire que pudiera haber entrado en el llenado (para un correcto funcionamiento del termosifón sin gases no condensables en su interior).

En la cara inferior del prisma estaba el conducto de salida al cual se le acopló otra válvula para poder vaciar el termosifón de fluido de trabajo. Por esta misma válvula se realizaba, también, el vacío de aire del termosifón previo al llenado con fluido de trabajo (evacuando los gases no condensables y permitiendo un llenado con fluido de trabajo más fácil).

La pastilla Peltier (Marlow 12-6) tenía unas dimensiones de 40x40 mm y un espesor de 4 mm, con una tensión nominal de 12 V e intensidad nominal de 6 A. Para un buen contacto entre la cara caliente del Peltier y el termosifón se impregnaron ambas superficies con pasta conductora.

Todas las caras del termosifón a excepción del disipador (cara donde se sitúan las aletas) estaban rodeadas del material aislante Armaflex. Con ello se conseguía que todo el calor generado por la pastilla Peltier se utilizase para calentar el fluido de trabajo y llevarlo hasta la ebullición y no para que se escapase por las paredes del termosifón. Dicho de otra manera, todo el calor que cedía el fluido de trabajo se evacuaba única y exclusivamente a través del disipador.

5.2.2 Colocación de las sondas

Para conseguir una adecuada información de cada ensayo, se colocaron sondas de temperatura y de presión en los principales puntos de interés del termosifón. Las sondas de medida constituían un conjunto formado por seis sondas de temperatura y una sonda de presión (Figura 5.2-4).

Todas las sondas de temperatura estaban en contacto íntimo con la pared del termosifón mediante pasta conductora y cinta aislante, evitando de esta manera la presencia de aire que daría una medida errónea. La sonda de temperatura de la cara caliente de la pastilla Peltier iba alojada en una ranura en la base del termosifón (Figura 5.2-4). La sonda de presión estaba situada en el conducto de entrada de la parte superior.

La medida más importante la daba la sonda de la cara caliente de la pastilla Peltier, ya que con esta se consigue calcular la resistencia térmica del prototipo prismático (Esta se define como el cociente entre la diferencia de temperatura entre la cara caliente de la pastilla Peltier y el ambiente, por la potencia generada por la propia pastilla). La temperatura de la cara fría de la pastilla Peltier permitía conocer el salto térmico entre las dos caras de la pastilla, y así comprobar su correcto funcionamiento. Las tres temperaturas restantes daban una idea de la distribución de temperaturas en el interior del termosifón.

Con la sonda de presión se conseguían los siguientes fines:

- Medir la presión de vacío: previamente a la carga de los fluidos de trabajo se realizaba el vacío de aire del interior del termosifón.
- Medir la presión del interior durante los ensayos: con esta presión se calcula la temperatura a la cual se halla el fluido por medio de la ecuación de Antoine. Esta temperatura se compara con la temperatura ambiente y con la temperatura de la parte inferior del termosifón. Tiene que situarse siempre entre ellas.

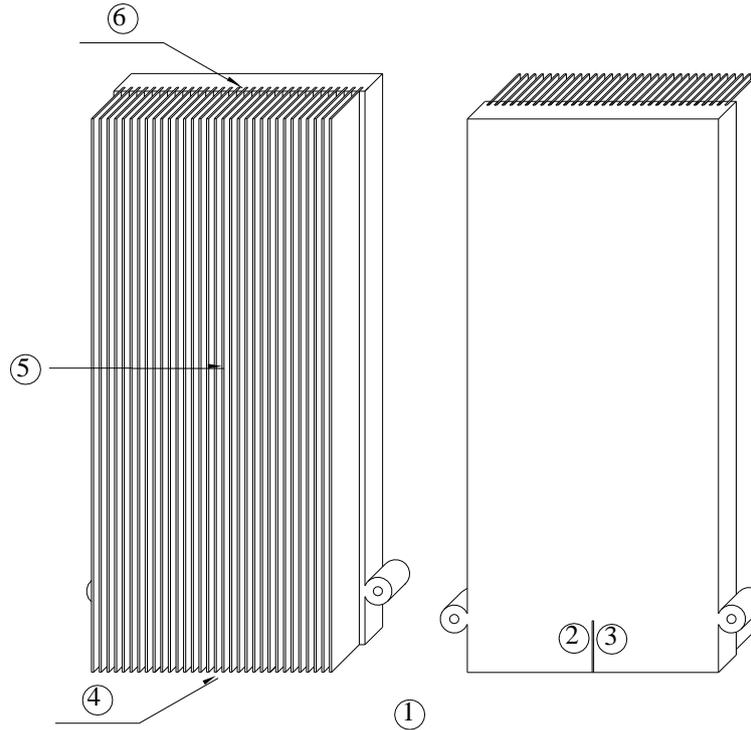


Figura 5.2-4 Posicionamiento de las sondas de temperatura en el termosifón: Temperatura de la cámara climática (1), temperatura de la cara caliente de la pastilla Peltier (2), temperatura de la cara fría de la pastilla Peltier (3), temperatura de la parte inferior del termosifón (4), temperatura de el punto medio del disipador (5) y temperatura de la parte superior del termosifón (6).

5.3 MÉTODO EXPERIMENTAL

5.3.1 Equipo de trabajo

Para la realización de los ensayos se dispuso de los siguientes equipos y material:

- Prototipo de termosifón prismático.
- Cámara climática CIMATS SPIRALE (la misma que en los ensayos con el termosifón cilíndrico). Por problemas con esta cámara climática, también se usó otra situada en la Planta Piloto 2 del Edificio Departamental de los Olivos, de la marca WEISS.
- Fuente de alimentación de corriente continua.
- Controlador de potencia.
- Pastilla Peltier, modelo DT12-6, Marlow Industries, Inc.
- Registrador de datos, modelo AMR, Almemo 5590-2.
- Bomba de vacío modelo 2P-3 TELSTAR.
- Depósito auxiliar y bomba manual.
- Sondass de temperatura y presión.

5.3.2 Conexiones eléctricas

Se realizaron dos tipos de ensayos: ensayos con control de potencia (CCP) y ensayos sin control de potencia (SCP). Como el medio utilizado para calentar el fluido hasta su ebullición era una pastilla Peltier alojada en la parte inferior de una de las caras del termosifón, la potencia que consumía dicho Peltier variaba según diversos factores, a saber, temperatura exterior e índice de llenado. En los primeros ensayos (SCP), la potencia no permanecía constante a lo largo del ensayo (de esta forma se obtuvieron variaciones máximas de potencia de casi un 10%, respecto de 50 W). Fue en el segundo bloque de ensayos donde se estableció una potencia de ensayo igual a 50 W (con variaciones respecto de los 50 W de un máximo de 2%). Esto se consiguió mediante la utilización de un controlador de potencia construido en la universidad.

5.3.2.1 Esquema de conexión para los ensayos sin control de potencia (SCP)

La fuente de alimentación se conectó directamente a la pastilla Peltier a través de un shunt, del cual salían las sondas de tensión e intensidad hacia el registrador de datos. La fuente de alimentación se reguló a una tensión constante de 13,2 V, con una potencia media aproximadamente de 50 W.

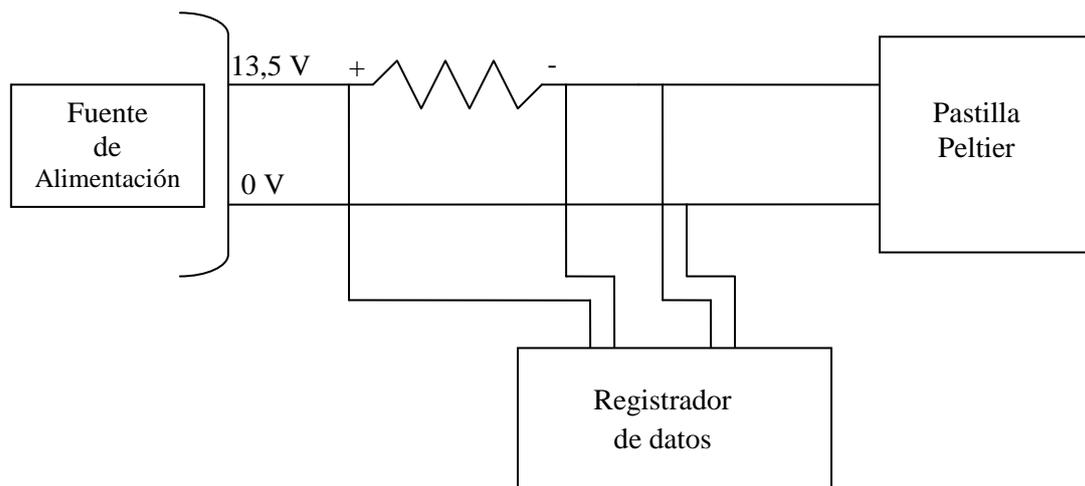


Figura 5.3-1 Esquema de conexiones sin control de potencia.

5.3.2.2 Esquema de conexión para los ensayos con control de potencia (CCP)

A diferencia de la conexión anterior, entre la fuente de alimentación y el shunt se conectó el dispositivo controlador de potencia. La fuente de alimentación se reguló a 24 V, y con la ayuda de un control manual se reguló el controlador para que entregara una tensión y una intensidad concretas cuyo producto fuera 50 W.

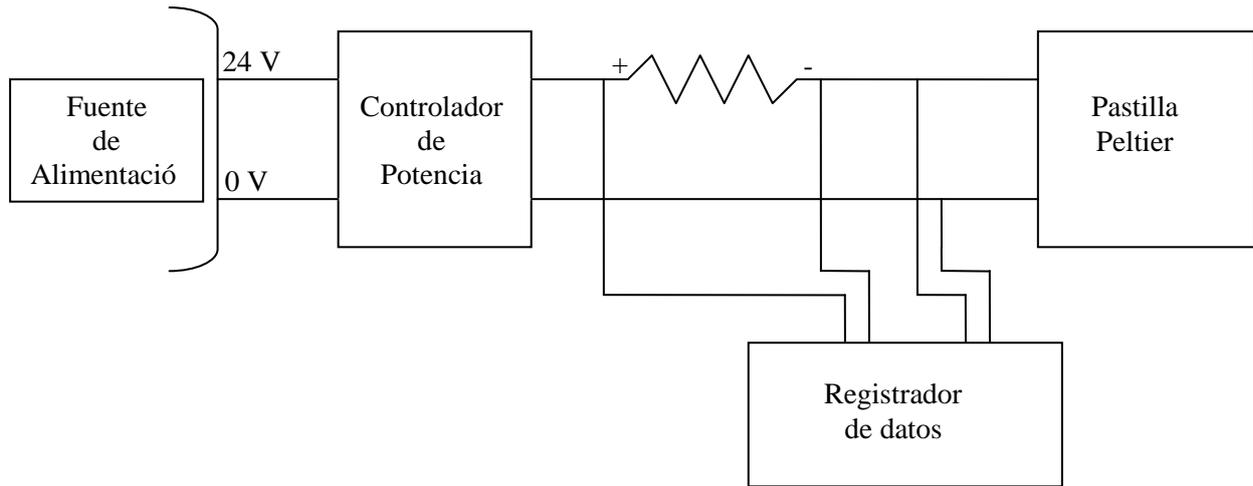


Figura 5.3-2 Esquema de conexiones con control de potencia.

5.3.3 Procedimiento de ensayo

Antes de llenar el termosifón con un fluido de trabajo, se alcanzaba un vacío inferior a 50 Pa (0,5 mbar) en el interior del termosifón. La presencia de aire dentro del recinto aumentaría la resistencia térmica.

Una vez vacío de aire el termosifón, se procedía al llenado de fluido de trabajo. Para cada sustancia se eligió ensayar con tres cargas, para comprobar la influencia de éstas sobre la resistencia térmica. Las tres cargas mencionadas se correspondían con los siguientes volúmenes de llenado:

- 108 cm³
- 155 cm³ ($\Delta V=47\text{cm}^3$)
- 232 cm³ ($\Delta V=77\text{cm}^3$)

Las dimensiones internas de la base del termosifón prismático eran 12 mm X 176 mm, que daban una superficie de 21,12 cm². El resultado de dividir el volumen entre esta superficie es la altura a la que se elevaba el fluido de trabajo en cada carga; en la Tabla 5.3-1 queda reflejado.

Carga	Volumen (cm ³)	Altura del fluido (cm)	Índice de llenado (%)
Baja	108	5,11	13,02
Media	155	7,34	18,69
Alta	232	10,985	27,96

Tabla 5.3-1 Cargas con cada fluido de trabajo. El índice de llenado se calcula como porcentaje sobre el volumen total, que es el volumen del recinto interior.

6 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS CON EL TERMOSIFÓN CILÍNDRICO

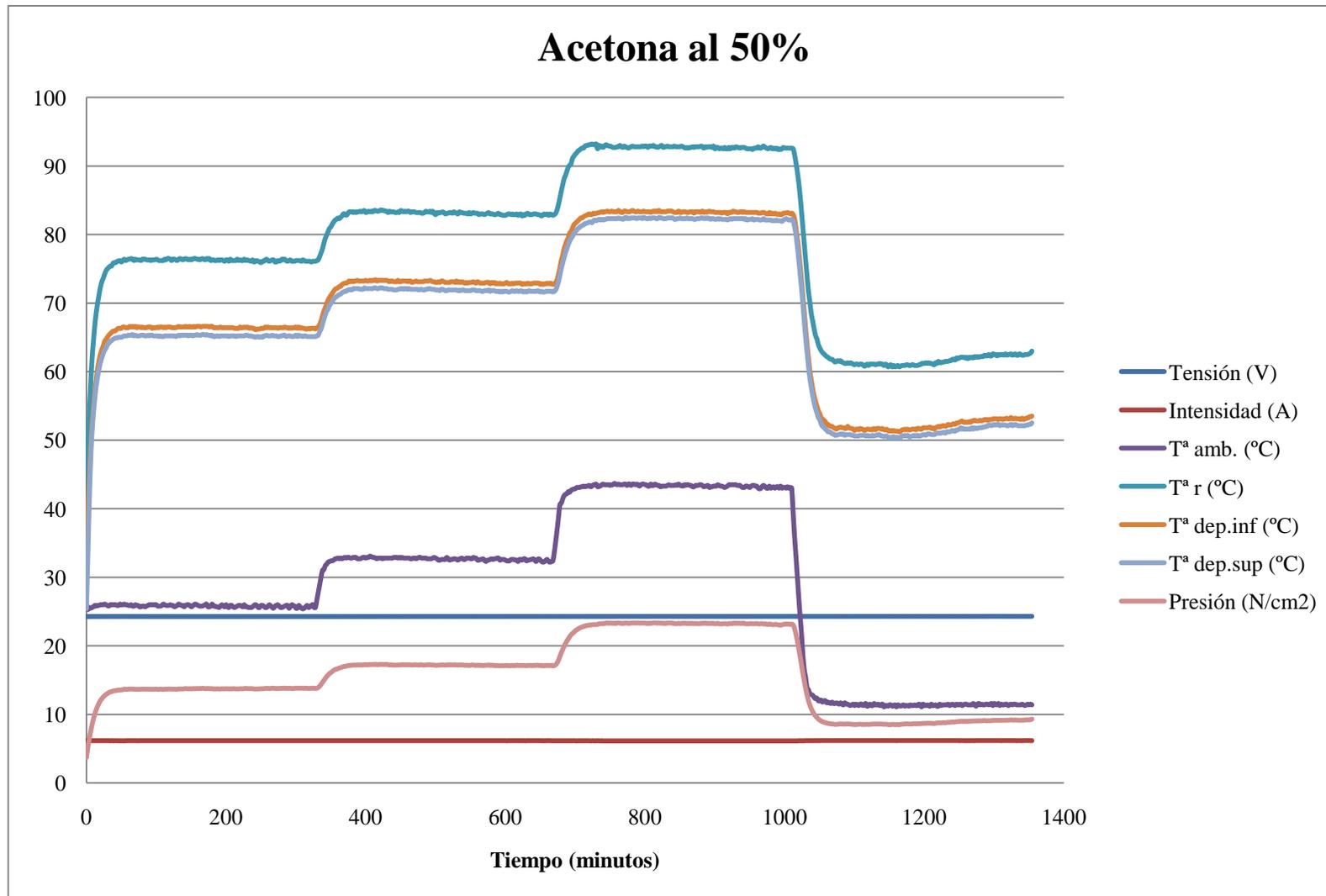
Ha llegado el momento de presentar los resultados proporcionados por los ensayos realizados.

6.1 RESULTADO DE UN ENSAYO

De cada ensayo se han obtenido las medidas de las siguientes sondas definidas en la sección 4.2 del capítulo 4:

- Sonda de temperatura de la resistencia “ T_r ”.
- Sonda de temperatura del depósito inferior del termosifón “ $T_{\text{dep.inf}}$ ”.
- Sonda de temperatura del depósito superior del termosifón “ $T_{\text{dep.sup}}$ ”.
- Sonda de temperatura de la cámara climática o del ambiente “ T_{amb} ”.
- Sonda de tensión “ V ”.
- Sonda de intensidad “ I ”.
- Sonda de presión manométrica “Presión”.

Como ya se ha explicado, estas medidas han quedado registradas en un PC a intervalos de dos minutos, y se representan en la siguiente gráfica (Gráfica 6.1-1). La presión se ha medido en unidades de mbar, pero se representa en unidades de N/cm^2 para que pudiera verse en la gráfica. Se pueden destacar tres aspectos de la gráfica: (1) La buena isothermicidad del prototipo, las temperaturas de los dos depósitos están muy próximas; (2) La tensión e intensidad se mantienen constantes a pesar del cambio de temperatura de la resistencia (T_r^a), demostrando la poca variabilidad de la resistencia con la temperatura y permitiendo unos ensayos con flujo de calor por el evaporador constante; (3) El ciclo de trabajo permite alcanzar el estado estacionario en el interior del termosifón para cada temperatura, manteniéndose en valores constantes las medidas de las sondas T_r^a , $T_{\text{dep.inf}}^a$, $T_{\text{dep.sup}}^a$ y presión manométrica, por largos periodos de tiempo (se puede apreciar en la gráfica que en el tramo del ciclo a 10°C el comportamiento del termosifón es más inestable; esto se ha repetido con la mayoría de fluidos de trabajo).



Gráfica 6.1-1 Representación de las lecturas de las sondas de un ensayo con el fluido de trabajo acetona, con carga del 50%, flujo de calor de 150 W y el termosifón en posición vertical. La temperatura ambiente o de la cámara climática sigue el ciclo de trabajo presentado en la sección 4.3 del capítulo 4. Las demás temperaturas y la presión del interior del termosifón van adaptándose a las diferentes condiciones ambientales (al subir la temperatura de la cámara climática y mantenerse el flujo de calor entrante por el evaporador constante, es lógico que el termosifón suba de temperatura y presión).

6.2 RESISTENCIAS TÉRMICAS E ISOTERMICIDAD

La forma de evaluar el comportamiento del termosifón en las diferentes condiciones de trabajo a las que ha sido sometido, es calculando la resistencia térmica que ofrece al paso del flujo de calor a través de él. Con este objeto se van a hallar, de cada sonda y por cada tramo en estado estacionario de la Gráfica 6.1-1, las medias de los datos registrados en intervalos de dos horas (60 datos, uno cada dos minutos); de esta manera se obtiene un valor más real de la situación del termosifón. Multiplicando las medidas de las sondas de tensión e intensidad, se calcula la potencia en forma calor que entra por el evaporador:

$$\bullet \quad \bar{T}_r = \frac{\sum_{i=1}^{60} T_{r_i}}{60} \quad (7.2-1)$$

$$\bullet \quad \overline{Pres} = \sum_{i=1}^{60} Presión_i \quad (7.2-2)$$

$$\bullet \quad \bar{T}_{amb} = \frac{\sum_{i=1}^{60} T_{amb_i}}{60} \quad (7.2-3)$$

$$\bullet \quad \bar{T}_{dep.inf} = \frac{\sum_{i=1}^{60} T_{dep.inf_i}}{60} \quad (7.2-4)$$

$$\bullet \quad \bar{T}_{dep.sup} = \frac{\sum_{i=1}^{60} T_{dep.sup_i}}{60} \quad (7.2-5)$$

$$\bullet \quad \overline{Pot} = \frac{\sum_{i=1}^{60} V_i * I_i}{60} \quad (7.2-6)$$

Con los valores arriba expuestos se va a definir la resistencia al paso del flujo de calor del termosifón de la siguiente manera:

- Resistencia térmica global (R_g): Resistencia al paso del calor del prototipo en su conjunto. Engloba la resistencia ofrecida desde la entrada del calor por el evaporador, hasta la salida del calor por el condensador, pasando por su transporte por el interior del termosifón. Se define como el cociente de la diferencia de temperatura entre la resistencia eléctrica y el ambiente entre la potencia producida por la fuente de alimentación.

$$R_g = \frac{\bar{T}_r - \bar{T}_{amb}}{\overline{Pot}} \quad (7.2 - 7)$$

- Resistencia térmica en el evaporador (R_e): Resistencia a la entrada del calor en el evaporador. Se define como el cociente de la diferencia de temperatura entre la resistencia eléctrica y el fluido líquido en el evaporador entre la potencia producida por la fuente de alimentación.

$$R_e = \frac{\bar{T}_r - \bar{T}_{dep.inf}}{\overline{Pot}} \quad (7.2 - 8)$$

- Resistencia térmica en el condensador (R_c): Resistencia a la evacuación del calor desde el condensador. Se define como el cociente de la diferencia de temperatura entre el vapor saturado en el condensador y el ambiente entre la potencia producida por la fuente de alimentación.

$$R_c = \frac{\bar{T}_{dep.sup} - \bar{T}_{amb}}{\overline{Pot}} \quad (7.2 - 9)$$

- Isotermicidad (I): Salto térmico entre el fluido saturado en el evaporador y el vapor saturado en el condensador. Una característica importante de los termosifones, es que, transportan el calor de un extremo al otro de su longitud, prácticamente a la temperatura que entra por el evaporador.

$$I = \bar{T}_{dep.inf} - \bar{T}_{dep.sup} \quad (7.2 - 10)$$

Los cambios de comportamiento debido, principalmente en este proyecto, a la variación del fluido de trabajo del interior del prototipo (también debido a variación de cualquier otra variable como la potencia de entrada, carga, inclinación...), se verán reflejados en una alteración en el valor de las distintas resistencias térmicas y la isotermicidad. Un mejor comportamiento del prototipo se traducirá en un valor menor de estos elementos de comparación.

6.3 COMPORTAMIENTO DEL TERMOSIFÓN SEGÚN LA TEMPERATURA DE LA CÁMARA CLIMÁTICA Y LA CARGA DE FLUIDO

Se va a comenzar el análisis del comportamiento del termosifón estudiando los cambios en su rendimiento al variar la temperatura de la cámara climática y la carga de fluido de trabajo. Para este fin, se van a comparar los ensayos realizados con un mismo fluido de trabajo para las cargas del 50%, 70% y 90%, flujo de calor de 150 W y el prototipo de termosifón en posición vertical.

La comparación entre ensayos se va a realizar representando en gráficas el valor de las resistencias térmicas e isotermicidad, definidas en la sección 6.2, frente a la temperatura ambiente media (\bar{T}_{amb}) de la cámara climática.

A la hora de representar los resultados de la resistencia térmica global, se va a añadir una gráfica en tres dimensiones donde se aprecia con más claridad la variación de rendimiento global del termosifón con respecto a la temperatura de la cámara climática y la carga de fluido de trabajo empleada. Para esta gráfica se ha empleado la temperatura de la cámara climática teórica (10 °C, 25 °C, 32 °C y 43 °C) en vez de la temperatura ambiente media. Se ha hecho de esta manera, ya que el programa utilizado no dejaba otra opción, y aunque se pierde un poco de exactitud permite ver la evolución de la resistencia térmica global.

Además, para cada fluido de trabajo, se muestran los resultados numéricos de los ensayos, en una serie de tablas.

6.3.1 Fluido de trabajo Acetona

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
11,40	887	61,71	52,33	51,35	150,15	0,335	0,062	0,266	0,980
25,78	1375	76,23	66,41	65,20	149,91	0,337	0,066	0,263	1,208
32,69	1719	83,15	73,05	71,89	149,85	0,337	0,067	0,262	1,161
43,36	2327	92,73	83,26	82,29	149,50	0,330	0,063	0,260	0,969

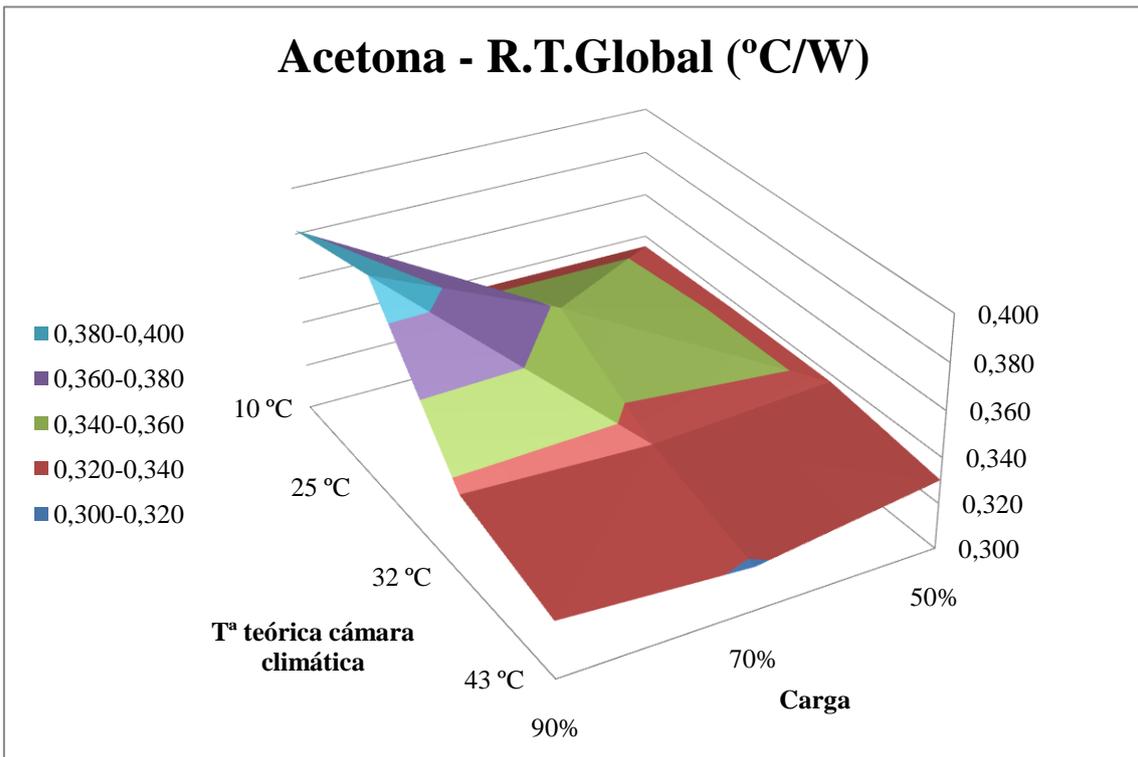
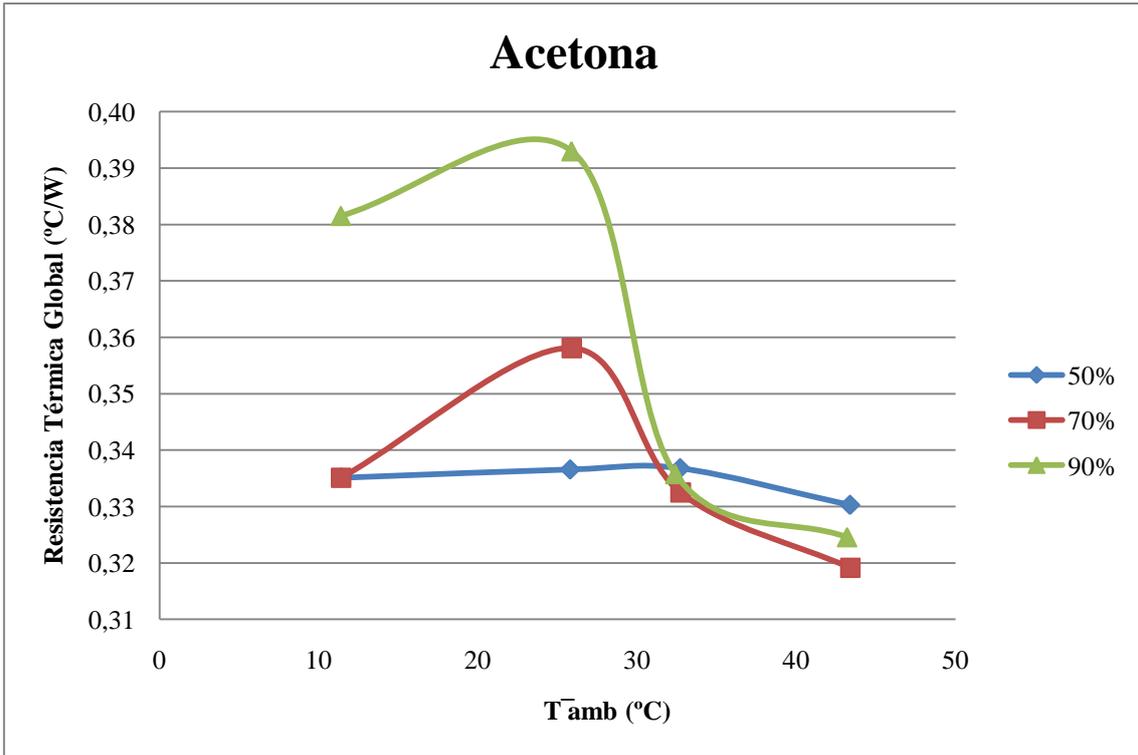
Tabla 6.3-1 Resultado numérico del ensayo con acetona al 50%, 150 W y posición vertical.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
11,40	829	61,62	49,46	47,70	149,86	0,335	0,081	0,242	1,752
25,89	1293	79,32	63,43	61,68	149,22	0,358	0,106	0,240	1,754
32,73	1599	82,41	69,80	68,63	149,44	0,332	0,084	0,240	1,169
43,39	2152	90,97	80,04	79,08	149,08	0,319	0,073	0,239	0,961

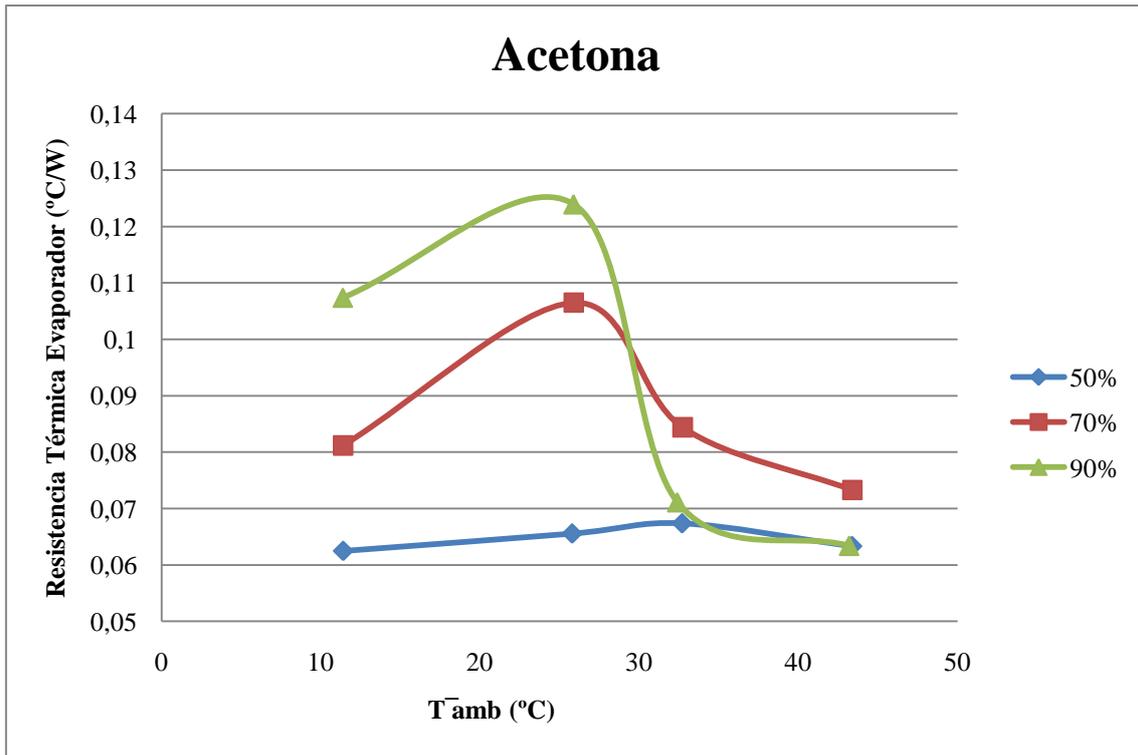
Tabla 6.3-2 Resultado numérico del ensayo con acetona al 70%, 150 W y posición vertical.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
11,39	863	68,66	52,53	50,87	150,10	0,382	0,107	0,263	1,667
25,87	1370	84,56	66,05	64,35	149,33	0,393	0,124	0,258	1,698
32,39	1657	82,59	71,95	70,72	149,51	0,336	0,071	0,256	1,237
43,18	2244	91,71	82,23	81,18	149,54	0,325	0,063	0,254	1,057

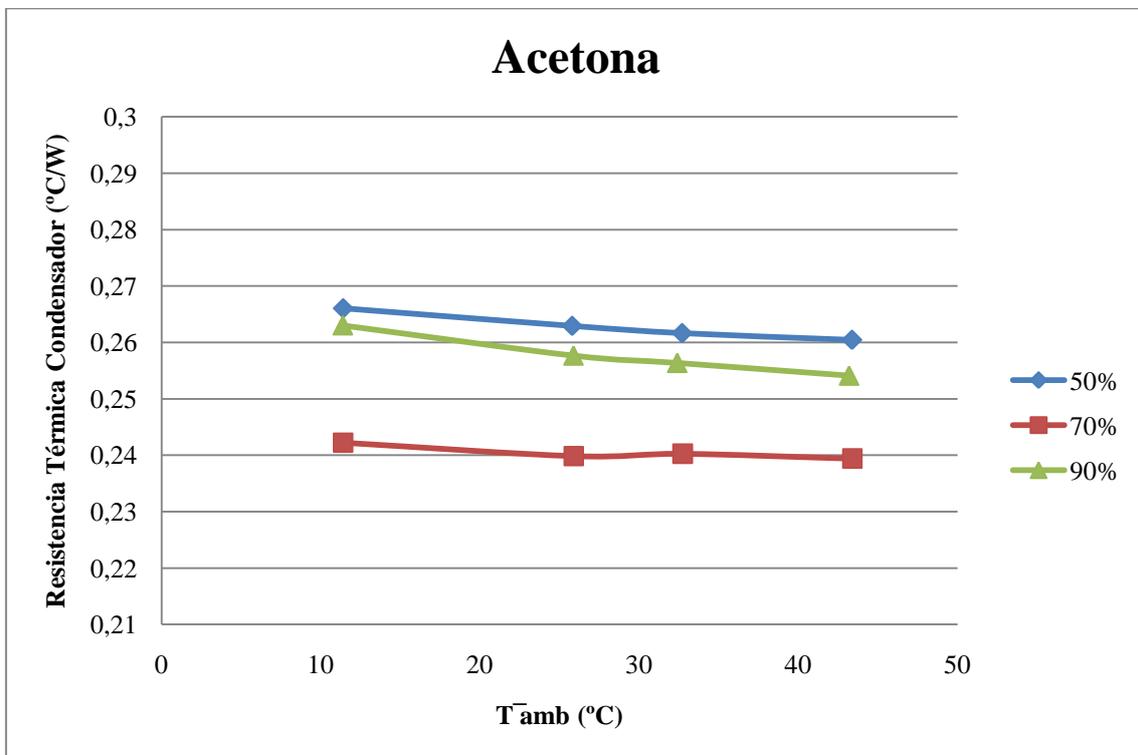
Tabla 6.3-3 Resultado numérico del ensayo con acetona al 90%, 150 W y posición vertical.



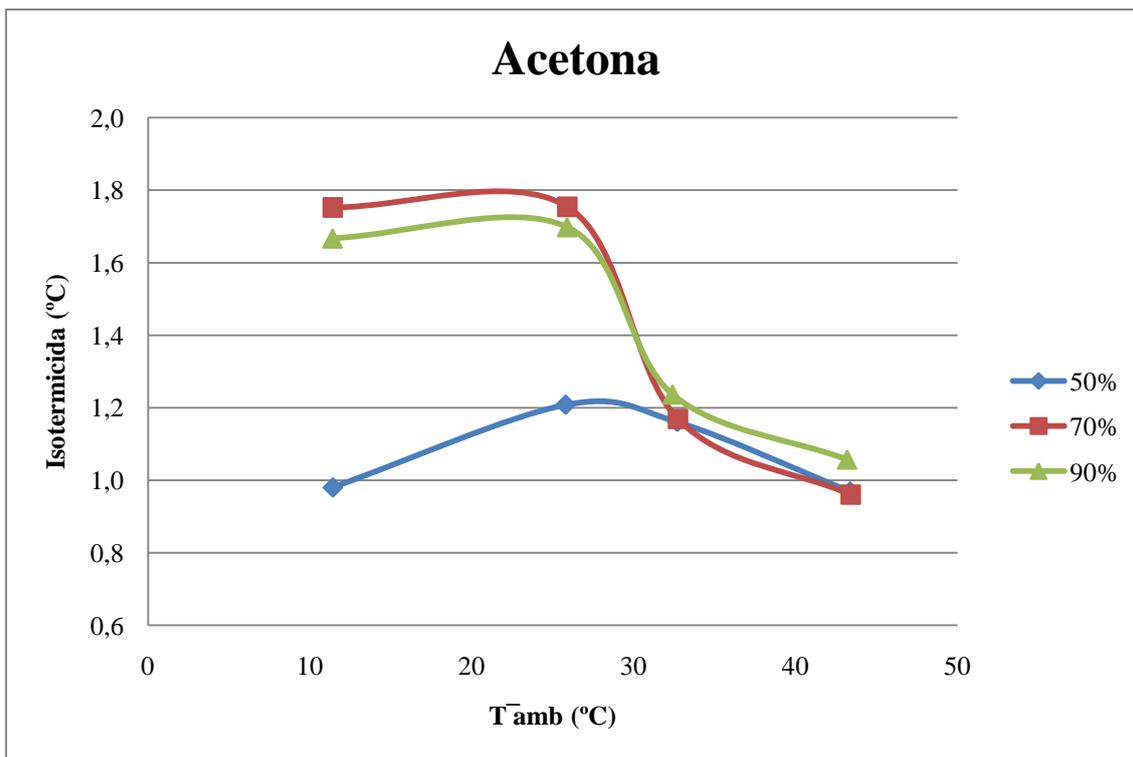
Gráfica 6.3-1 Variación de la resistencia térmica global con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-2 Variación de la resistencia térmica en el evaporador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-3 Variación de la resistencia térmica en el condensador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-4 Variación de la isotermicidad con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.

6.3.2 Fluido de trabajo mezcla Acetona-NPentano¹

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,11	1694	55,60	47,61	46,74	150,59	0,302	0,053	0,243	0,863
24,59	2777	71,53		63,19	150,33	0,312		0,257	
31,44	3244	76,76		68,90	149,70	0,303		0,250	
42,49	4315	87,17		79,71	149,41	0,299		0,249	

Tabla 6.3-4 Resultado numérico del ensayo con mezcla acetona-Npentano al 50%, 150 W y posición vertical.

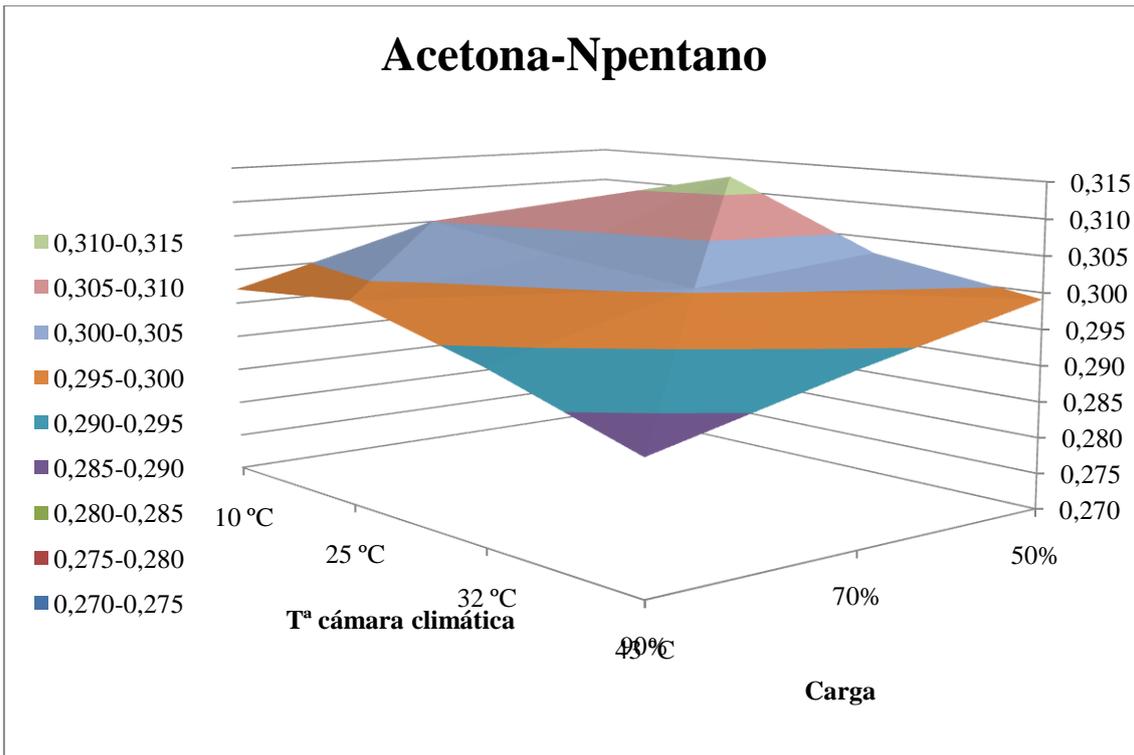
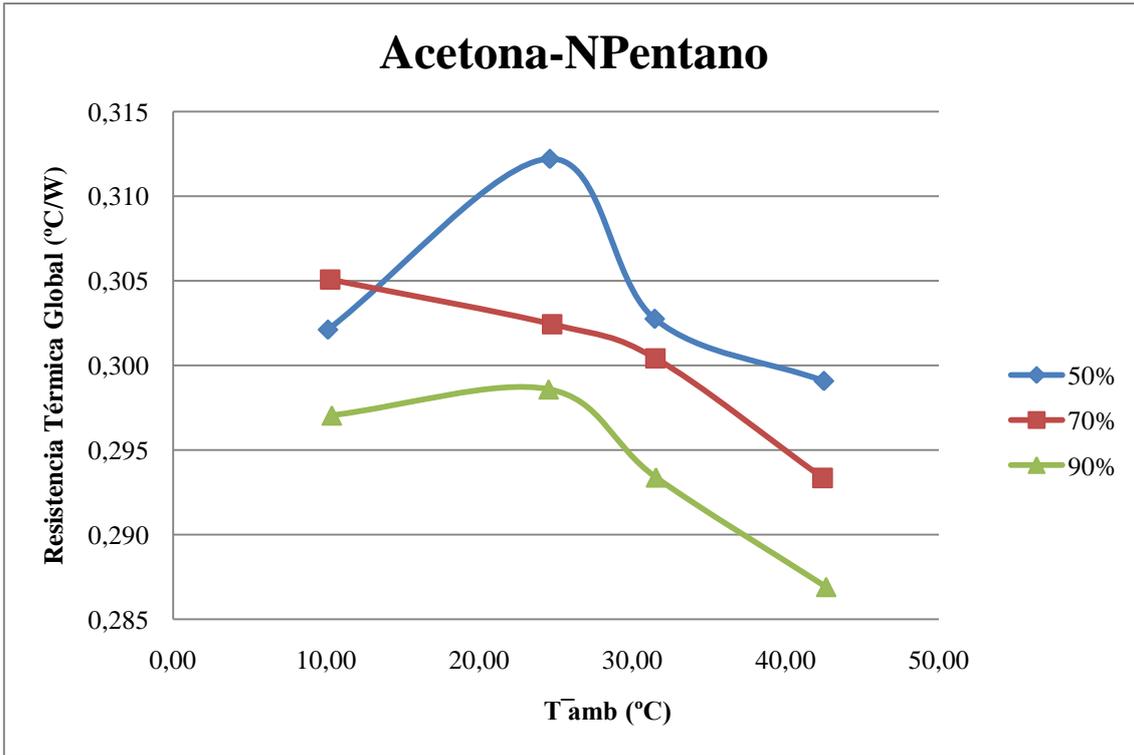
\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,25	1671	56,14	46,85	46,24	150,40	0,305	0,062	0,239	0,613
24,74	2668	70,07	62,36	61,77	149,87	0,302	0,051	0,247	0,585
31,50	3218	76,46	68,96	68,41	149,67	0,300	0,050	0,247	0,550
42,41	4265	86,17	79,77	79,19	149,18	0,293	0,043	0,247	0,575

Tabla 6.3-5 Resultado numérico del ensayo con mezcla acetona-Npentano al 70%, 150 W y posición vertical.

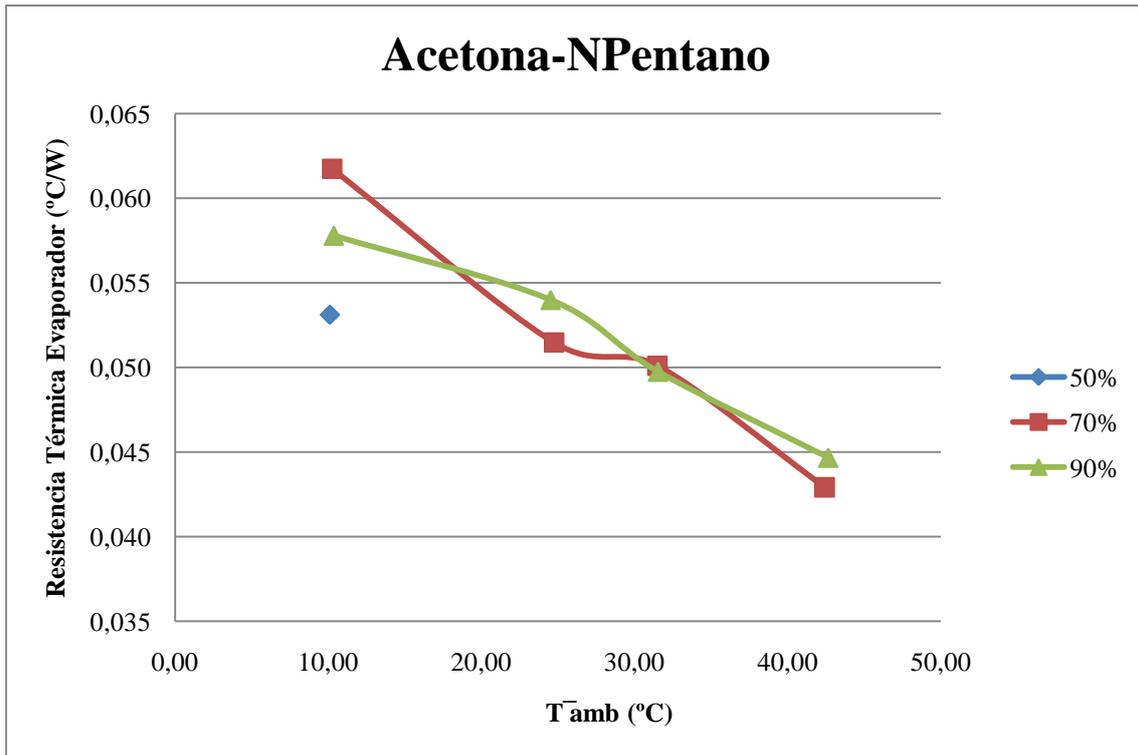
\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,36	1645	54,91	46,24	45,67	149,96	0,297	0,058	0,235	0,578
24,52	2588	69,25	61,16	60,57	149,79	0,299	0,054	0,241	0,593
31,53	3122	75,23	67,82	67,21	148,96	0,293	0,050	0,240	0,612
42,64	4156	85,31	78,67	78,09	148,73	0,287	0,045	0,238	0,577

Tabla 6.3-6 Resultado numérico del ensayo con mezcla acetona-Npentano al 90%, 150 W y posición vertical.

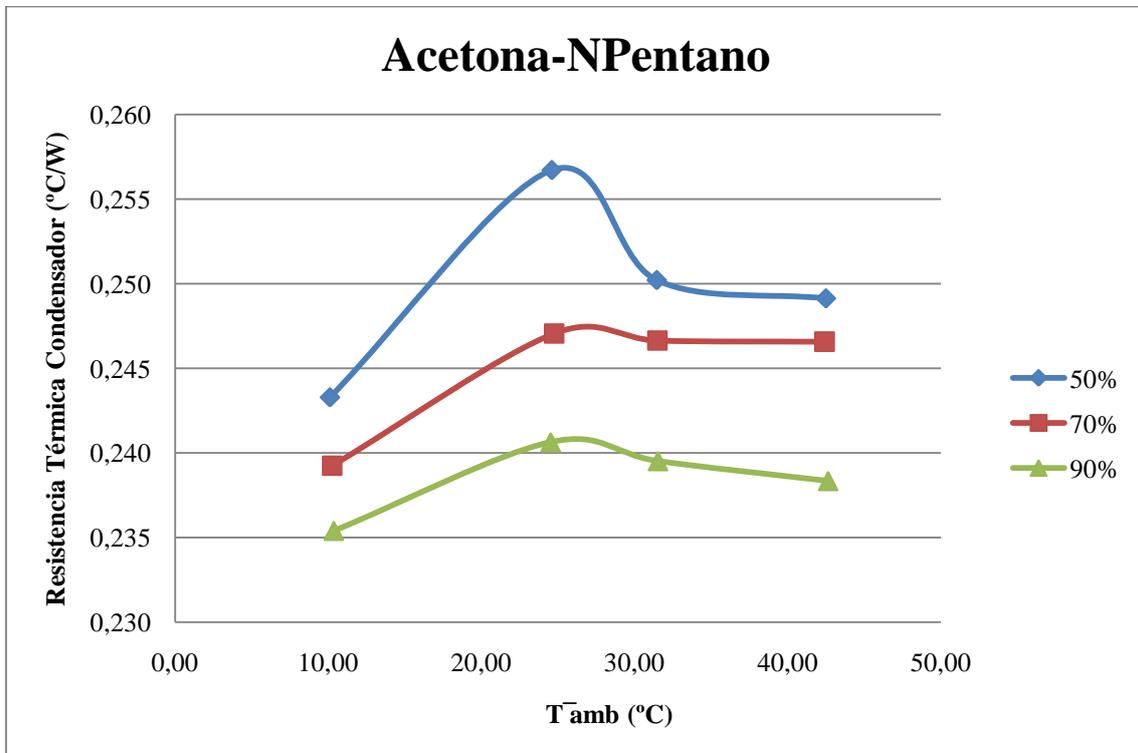
¹ En el ensayo con la mezcla acetona-Npentano al 50% falló la sonda de temperatura del depósito inferior.



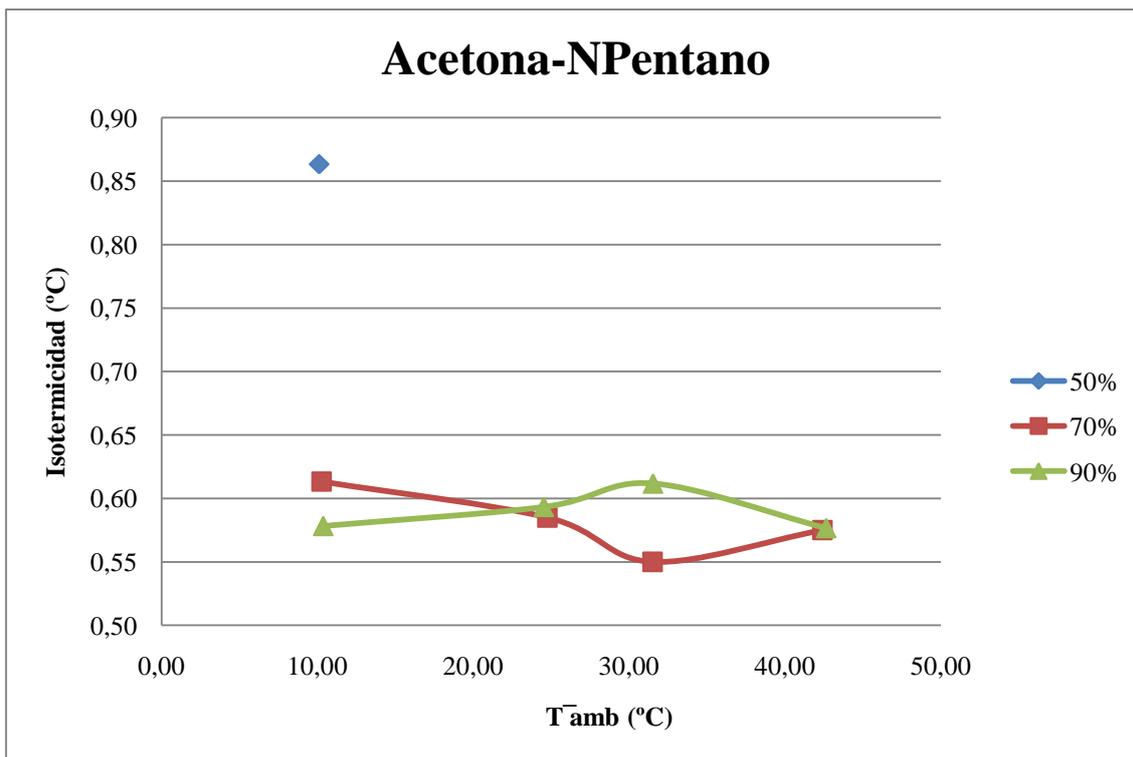
Gráfica 6.3-5 Variación de la resistencia térmica global con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-6 Variación de la resistencia térmica en el evaporador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-7 Variación de la resistencia térmica en el condensador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-8 Variación de la isotermicidad con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.

6.3.3 Fluido de trabajo Agua²

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,51	113	60,75	53,71	50,10	149,92	0,335	0,047	0,264	3,610
24,96	246	73,72	67,69	64,56	149,72	0,326	0,040	0,264	3,132
31,81	328	79,68	73,55	71,24	149,52	0,320	0,041	0,264	2,308
42,75	499	88,33	82,98	81,41	149,33	0,305	0,036	0,259	1,569

Tabla 6.3-7 Resultado numérico del ensayo con agua al 50%, 150 W y posición vertical.

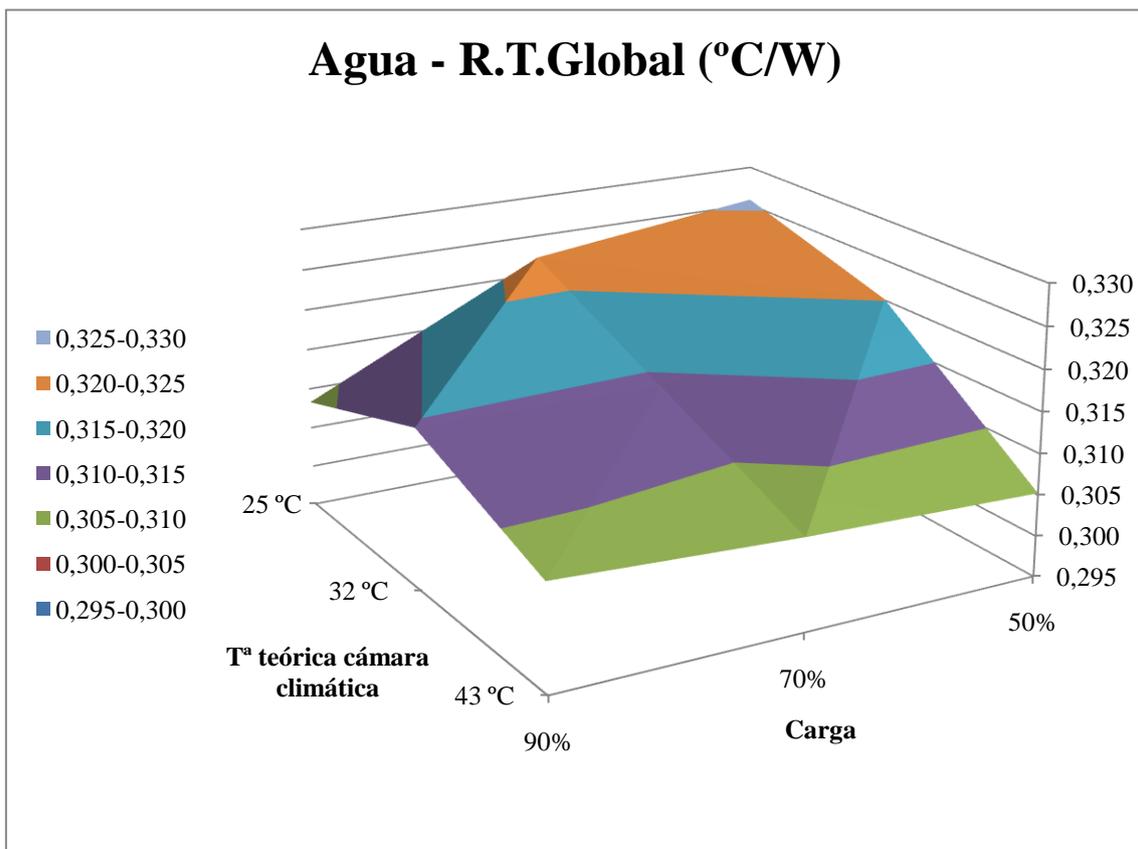
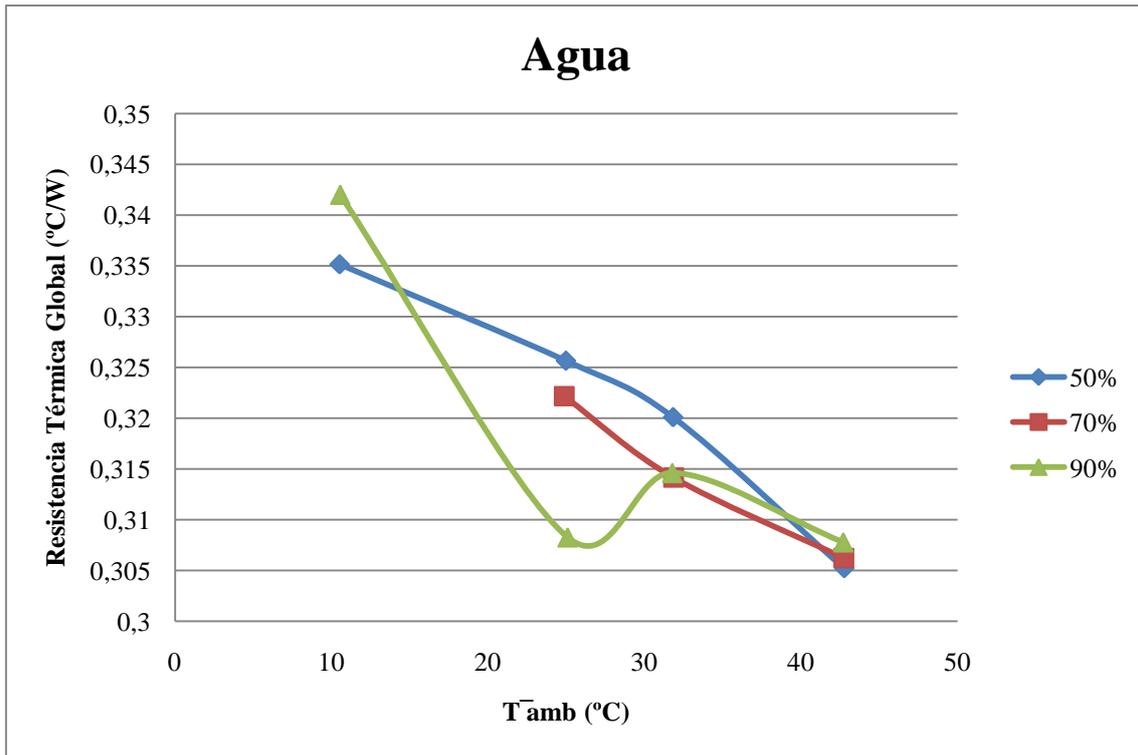
\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
24,87	221	73,18	65,99	63,40	149,97	0,322	0,048	0,257	2,589
31,85	303	78,94	72,02	70,13	149,89	0,314	0,046	0,255	1,882
42,73	477	88,68	81,89	80,62	150,05	0,306	0,045	0,253	1,270

Tabla 6.3-8 Resultado numérico del ensayo con agua al 70%, 150 W y posición vertical.

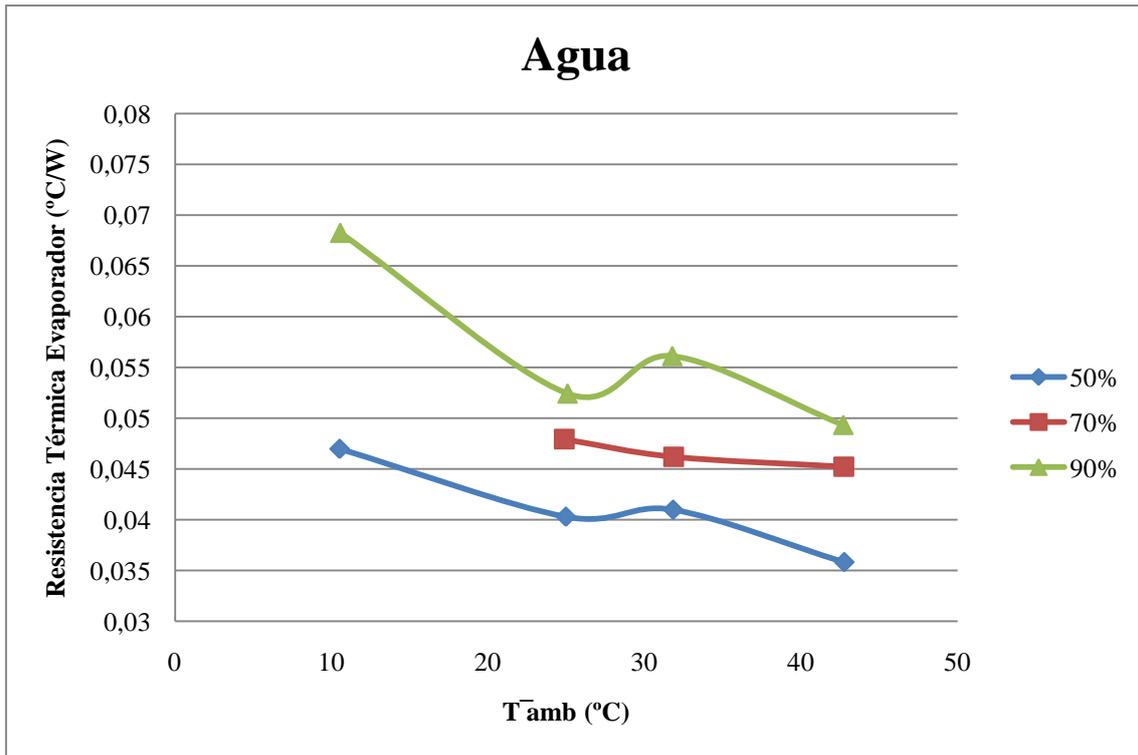
\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,56	93	61,87	51,63	48,27	150,03	0,342	0,068	0,251	3,357
25,08	191	71,25	63,40	60,60	149,78	0,308	0,052	0,237	2,795
31,76	273	78,84	70,44	67,87	149,63	0,315	0,056	0,241	2,575
42,69	442	88,69	81,31	78,90	149,45	0,308	0,049	0,242	2,407

Tabla 6.3-9 Resultado numérico del ensayo con agua al 90%, 150 W y posición vertical.

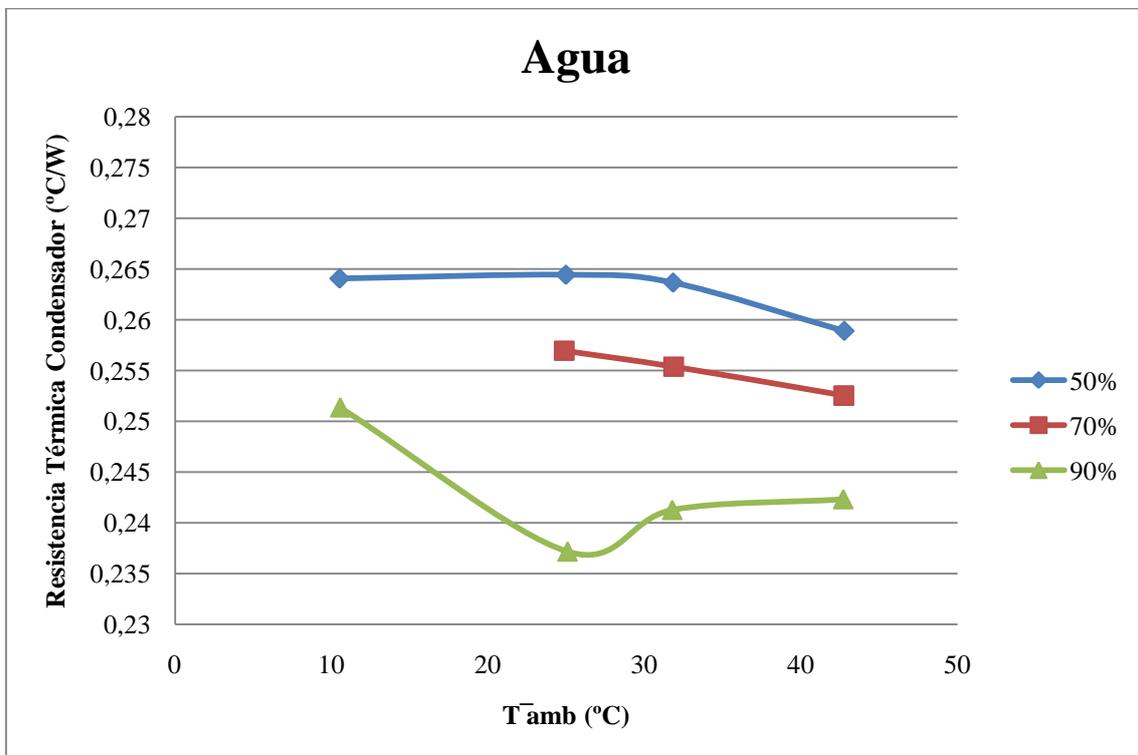
² En el ensayo con agua al 70% no se llegó al estado estacionario para la temperatura de la cámara climática de 10°C.



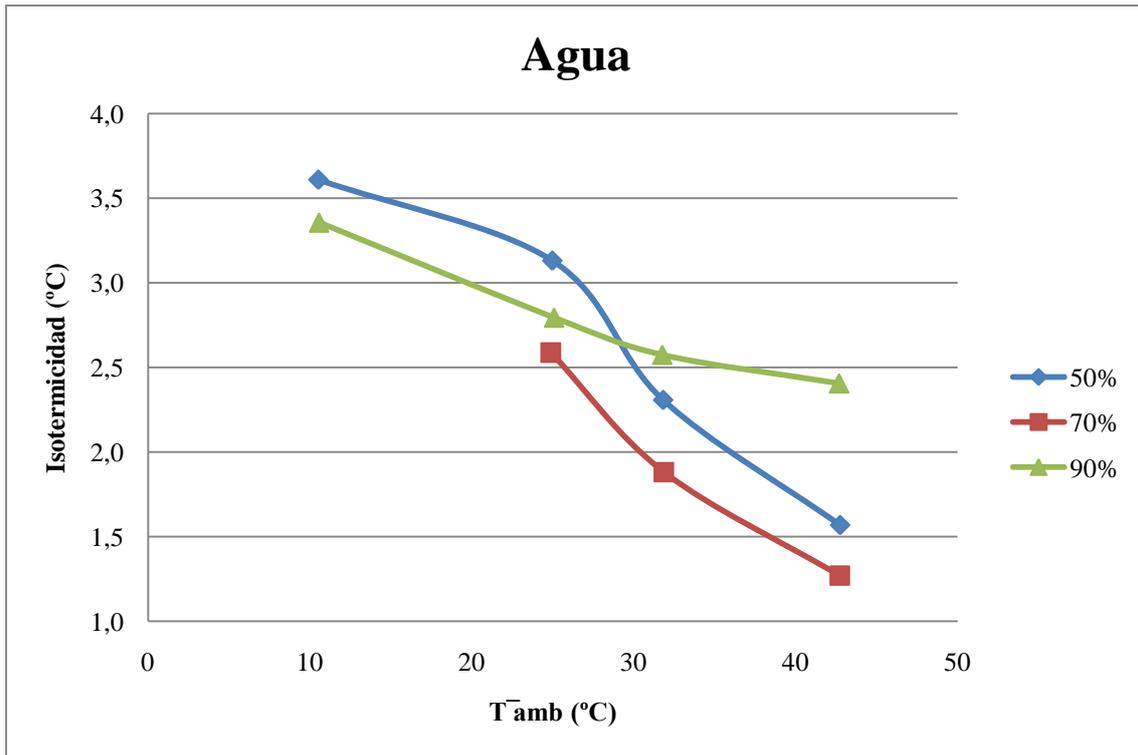
Gráfica 6.3-9 Variación de la resistencia térmica global con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-10 Variación de la resistencia térmica en el evaporador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-11 Variación de la resistencia térmica en el condensador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-12 Variación de la isotermicidad con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.

6.3.4 Fluido de trabajo Ciclopentano

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,41	1012	61,10	50,95	48,47	147,80	0,343	0,069	0,258	2,480
25,05	1630	75,62	65,70	64,56	148,36	0,341	0,067	0,266	1,139
32,13	1976	81,89	72,15	71,27	146,98	0,339	0,066	0,266	0,885
42,80	2671	92,39	82,96	82,24	149,12	0,333	0,063	0,265	0,715

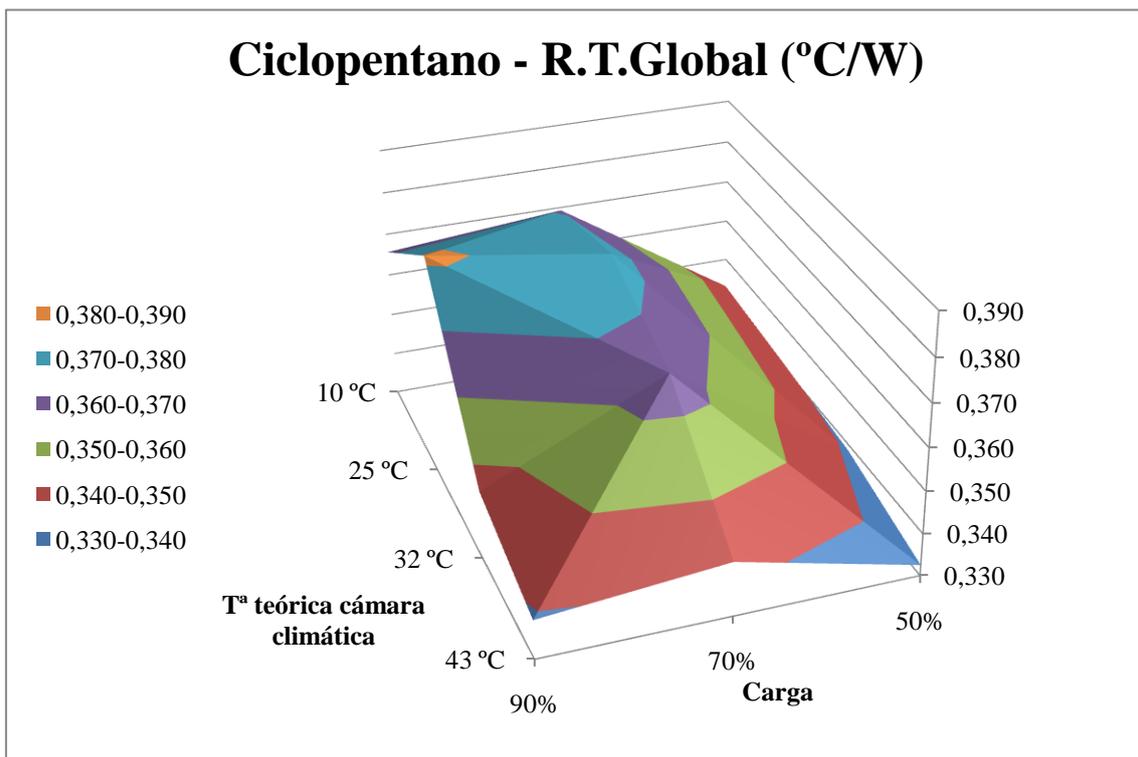
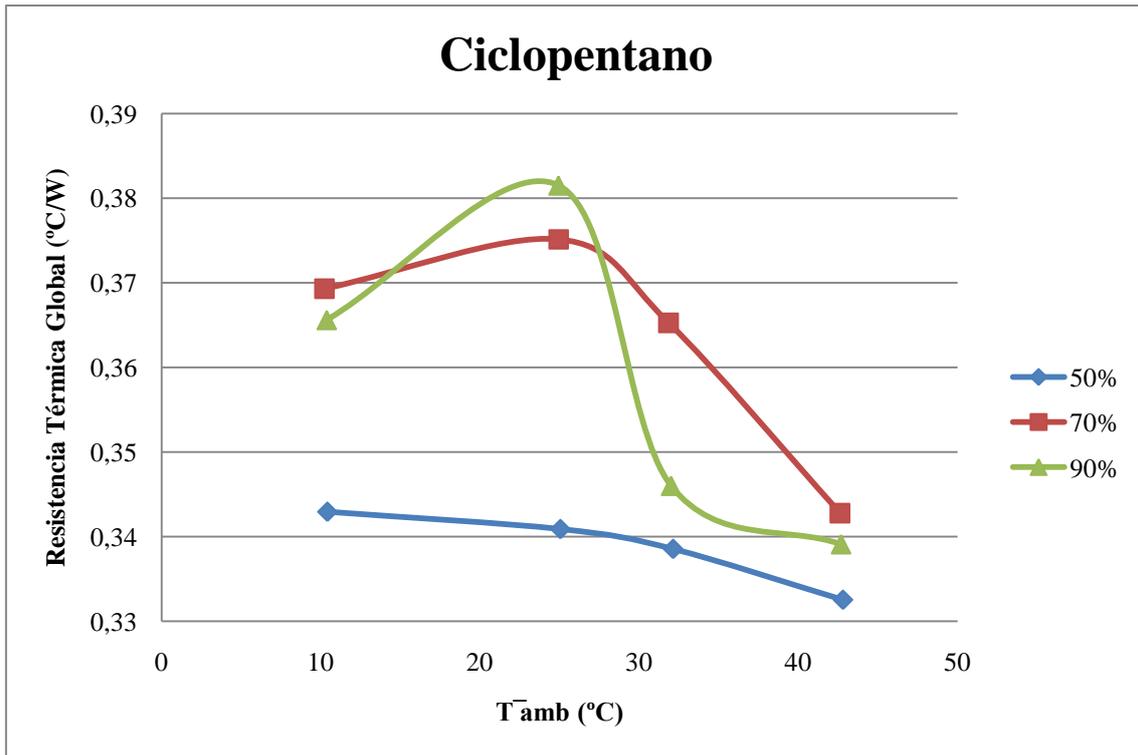
Tabla 6.3-10 Resultado numérico del ensayo con ciclopentano al 50%, 150 W y posición vertical.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,23	1015	65,74	50,94	45,22	150,33	0,369	0,099	0,233	5,713
24,93	1697	81,23	66,98	65,27	150,07	0,375	0,095	0,269	1,709
31,84	2063	86,61	73,58	72,58	149,96	0,365	0,087	0,272	0,997
42,61	2738	93,95	83,88	83,17	149,78	0,343	0,067	0,271	0,708

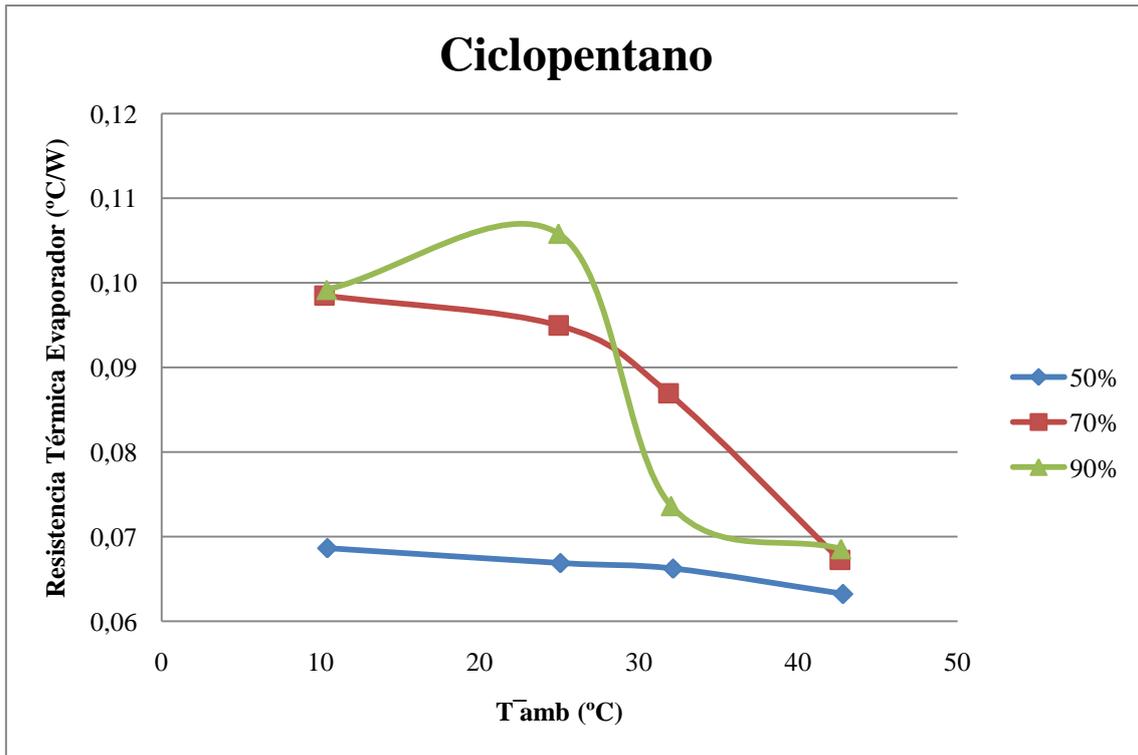
Tabla 6.3-11 Resultado numérico del ensayo con ciclopentano al 70%, 150 W y posición vertical.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,36	1007	65,28	50,38	48,17	150,22	0,366	0,099	0,252	2,211
24,92	1665	82,10	66,24	65,24	149,86	0,382	0,106	0,269	1,000
32,00	2019	83,84	72,81	72,07	149,82	0,346	0,074	0,267	0,739
42,69	2685	93,40	83,15	82,52	149,56	0,339	0,069	0,266	0,634

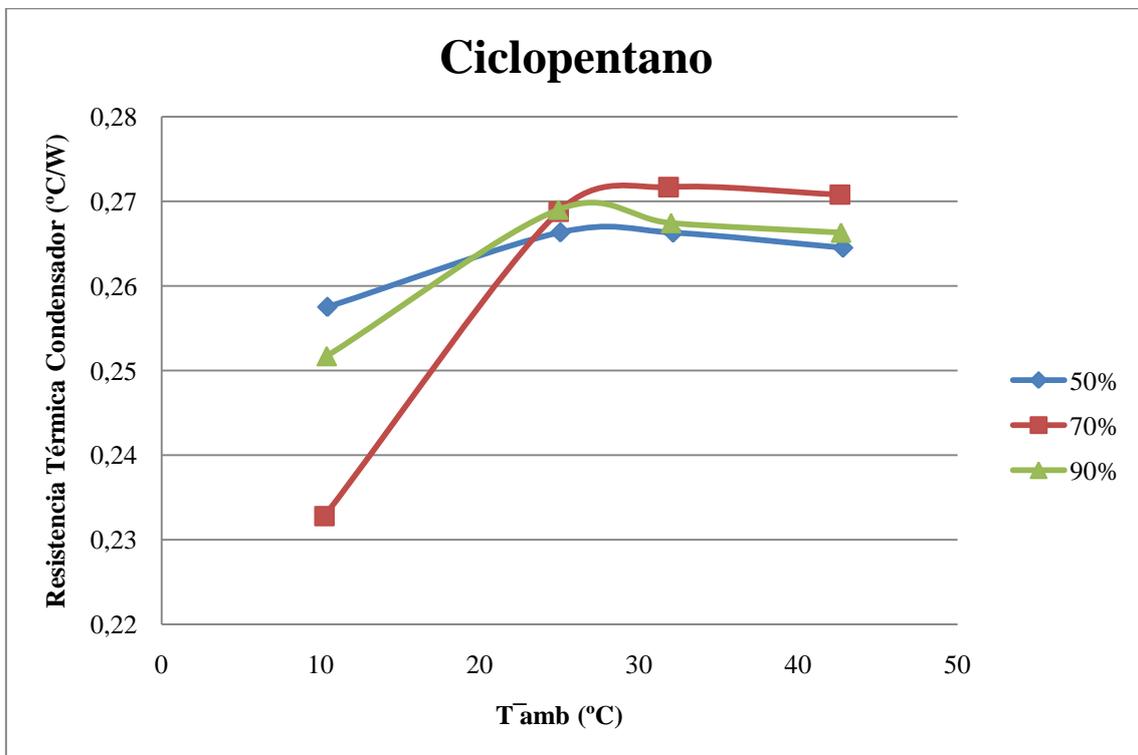
Tabla 6.3-12 Resultado numérico del ensayo con ciclopentano al 90%, 150 W y posición vertical.



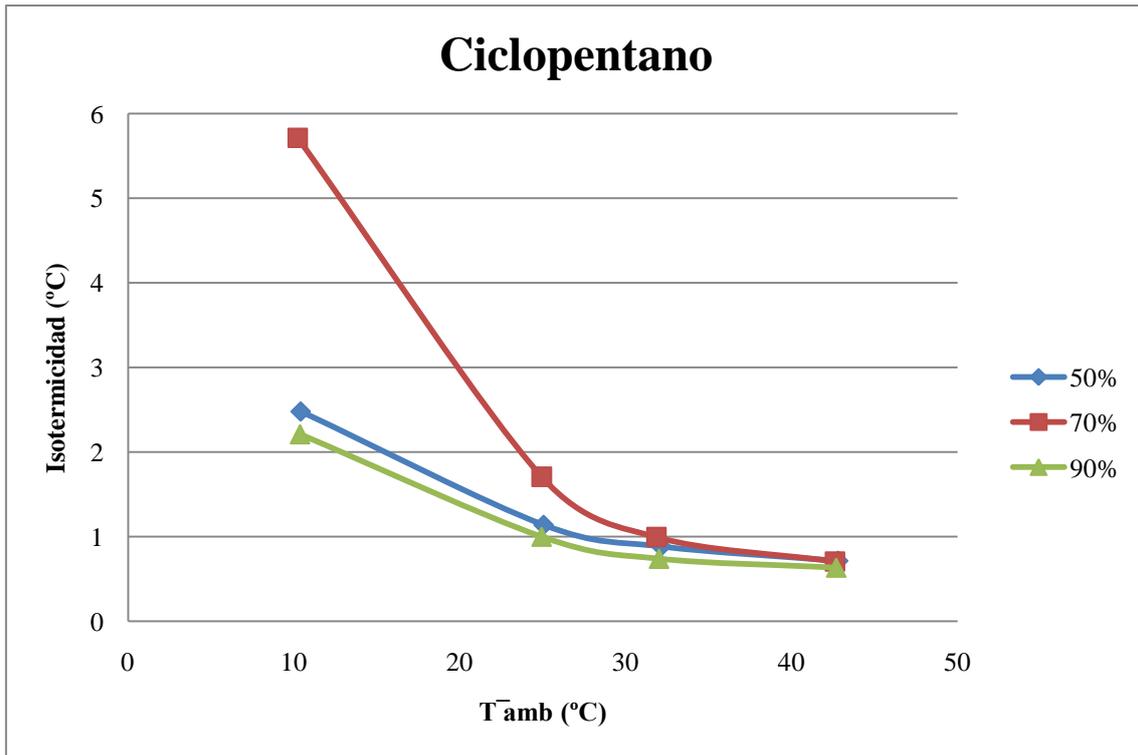
Gráfica 6.3-13 Variación de la resistencia térmica global con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-14 Variación de la resistencia térmica en el evaporador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-15 Variación de la resistencia térmica en el condensador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-16 Variación de la isotermicidad con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.

6.3.5 Fluido de trabajo mezcla Ciclopentano-Metanol

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
11,24	1505	62,66	51,60	50,75	149,77	0,343	0,074	0,264	0,848
25,51	2460	75,55	65,83	65,08	149,51	0,335	0,065	0,265	0,754
32,39	3022	82,00	72,46	71,67	149,40	0,332	0,064	0,263	0,787
43,24	4127	92,37	83,06	82,12	149,12	0,329	0,062	0,261	0,943

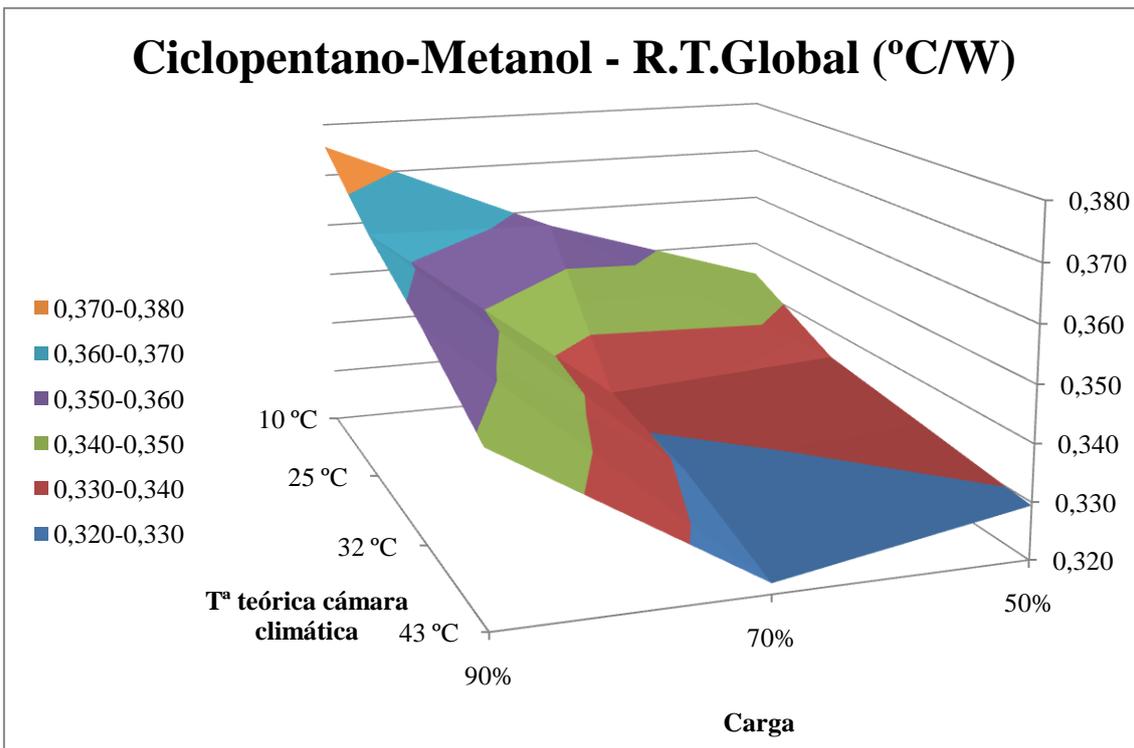
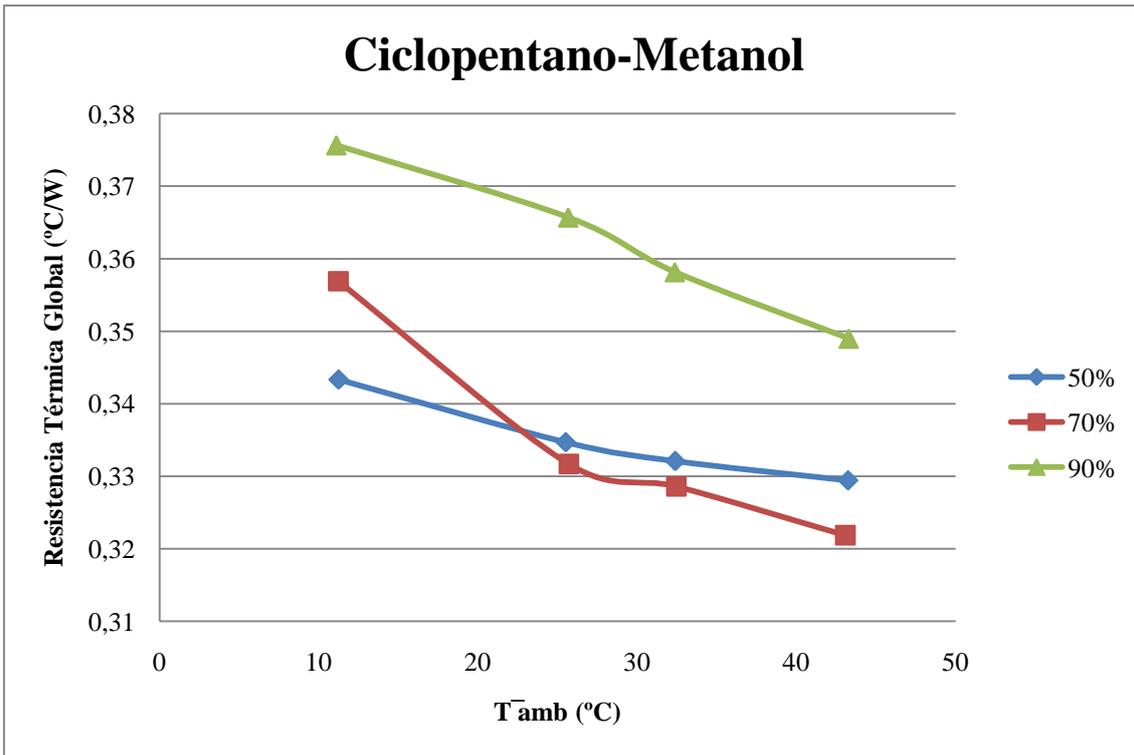
Tabla 6.3-13 Resultado numérico del ensayo con mezcla ciclopentano-metanol al 50%, 150 W y posición vertical.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
11,22	1449	64,97	50,57	49,60	150,59	0,357	0,096	0,255	0,972
25,71	2384	75,46	65,04	64,27	150,00	0,332	0,070	0,257	0,766
32,45	2942	81,75	71,62	70,80	150,00	0,329	0,068	0,256	0,813
43,08	4023	91,30	82,11	81,21	149,83	0,322	0,061	0,255	0,898

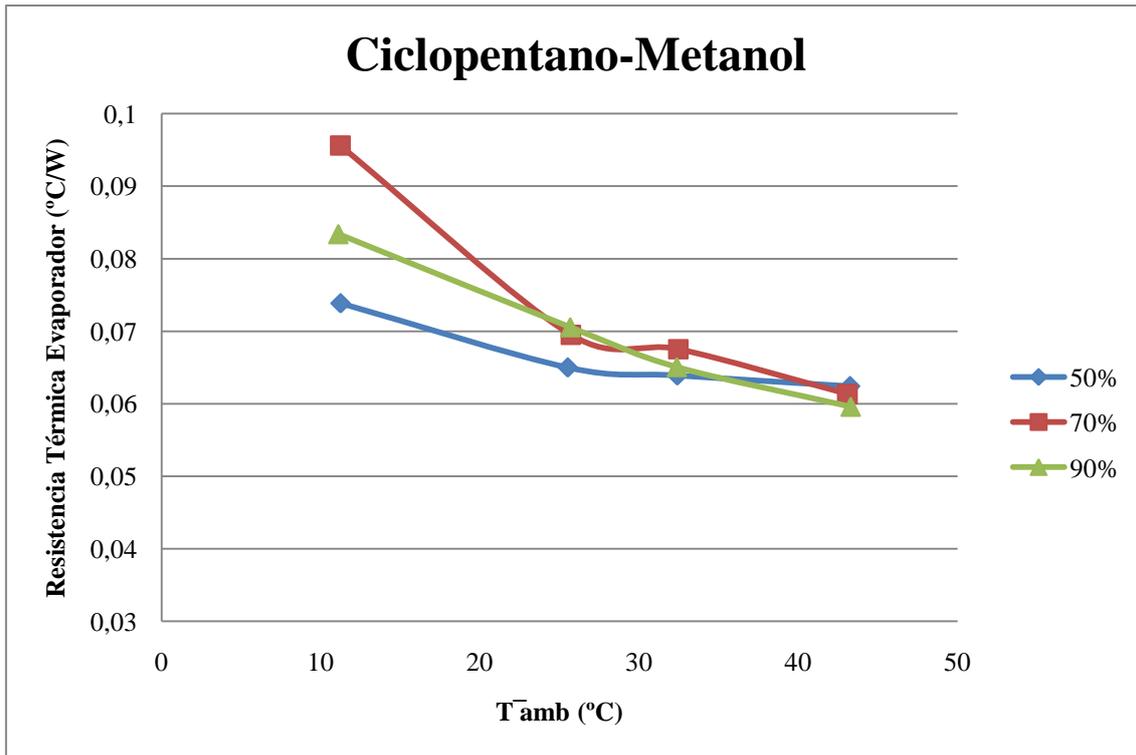
Tabla 6.3-14 Resultado numérico del ensayo con mezcla ciclopentano-metanol al 70%, 150 W y posición vertical.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
11,10	1691	67,28	54,81	36,84	149,55	0,376	0,083	0,172	17,964
25,67	2762	80,07	69,57	55,63	148,77	0,366	0,071	0,201	13,941
32,36	3373	85,65	75,97	65,29	148,79	0,358	0,065	0,221	10,677
43,28	4577	95,23	86,36	80,05	148,85	0,349	0,060	0,247	6,310

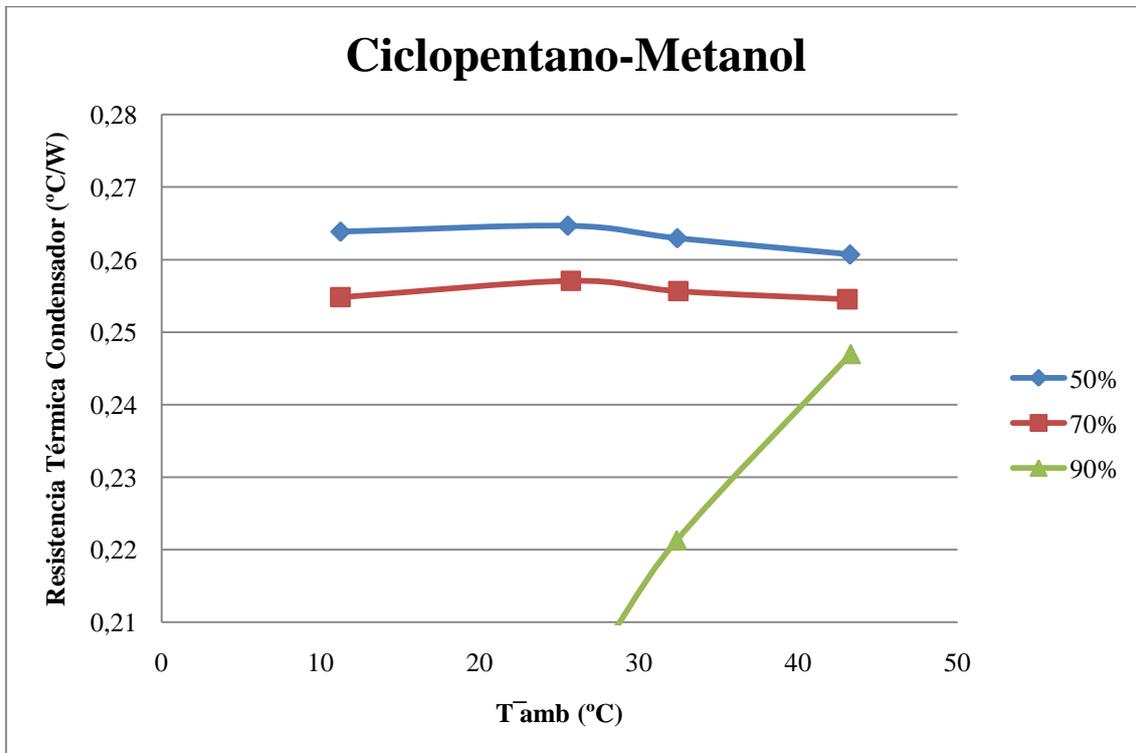
Tabla 6.3-15 Resultado numérico del ensayo con mezcla ciclopentano-metanol al 90%, 150 W y posición vertical.



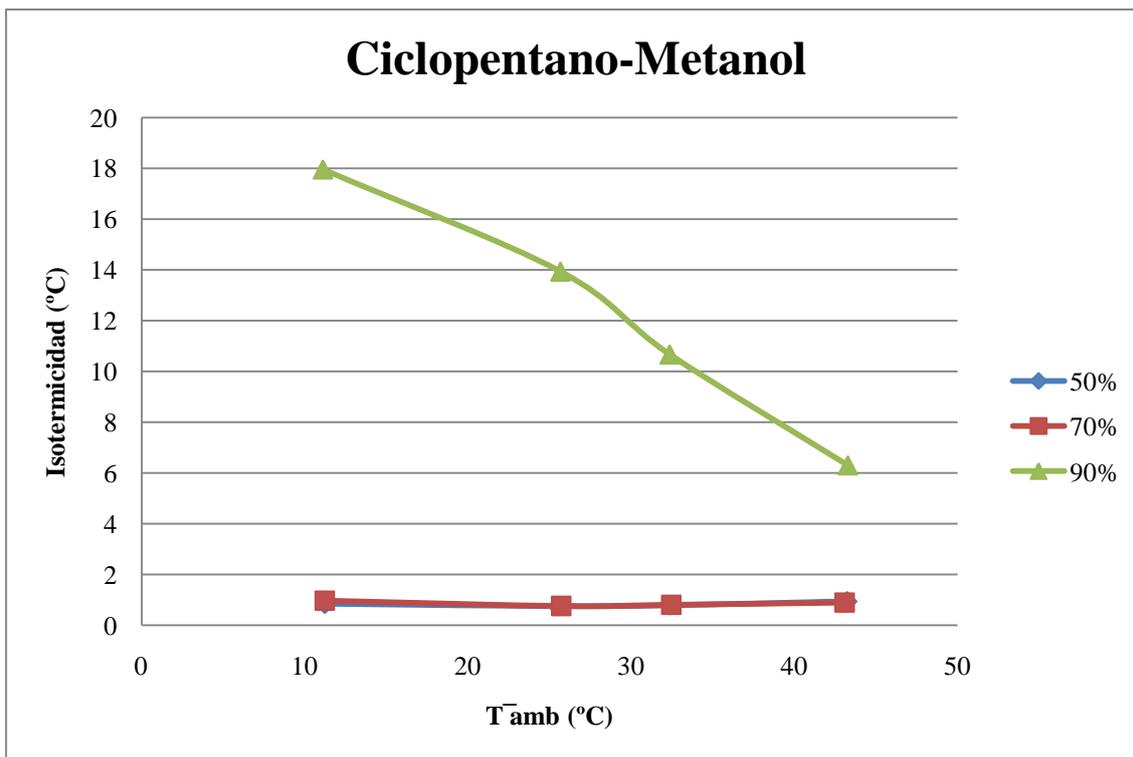
Gráfica 6.3-17 Variación de la resistencia térmica global con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-18 Variación de la resistencia térmica en el evaporador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-19 Variación de la resistencia térmica en el condensador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-20 Variación de la isotermicidad con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.

6.3.6 Fluido de trabajo Dietil Éter

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,47	1806	60,43	52,18	51,24	150,50	0,332	0,055	0,271	0,939
24,90	2669	73,23	65,17	63,84	150,12	0,322	0,054	0,259	1,333
31,72	3201	79,38	71,59	70,83	150,17	0,317	0,052	0,260	0,757
42,69	4223	89,30	82,09	81,38	149,92	0,311	0,048	0,258	0,710

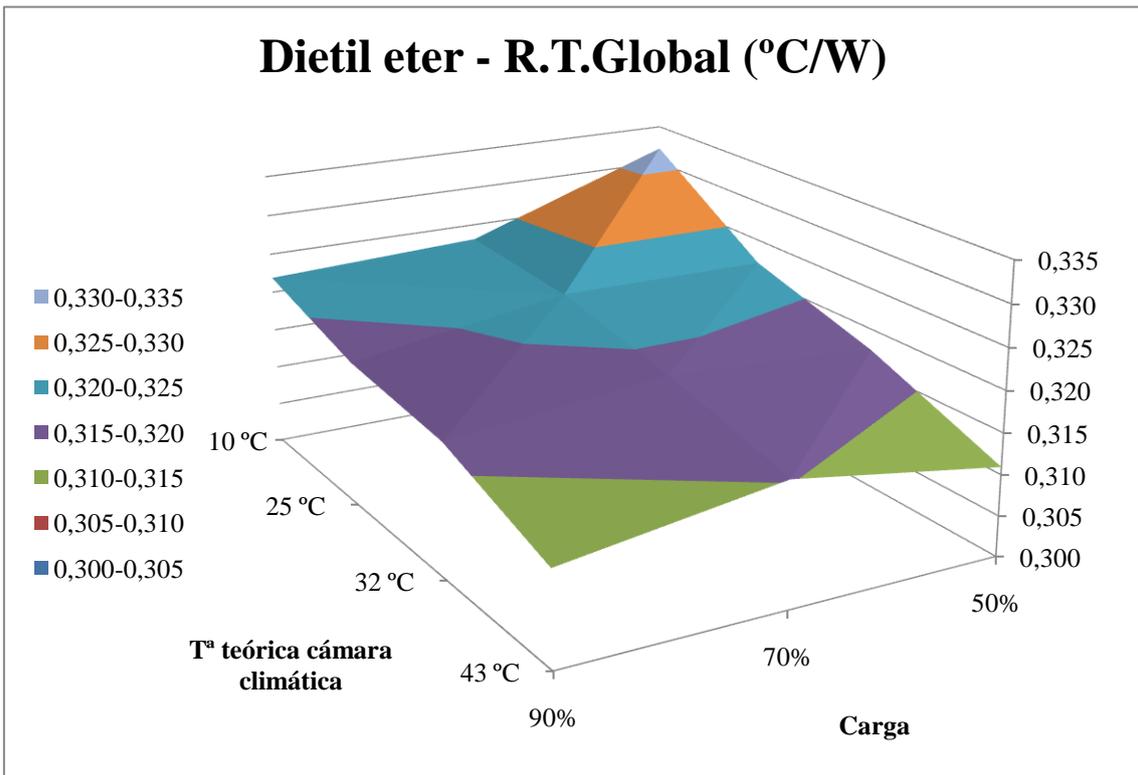
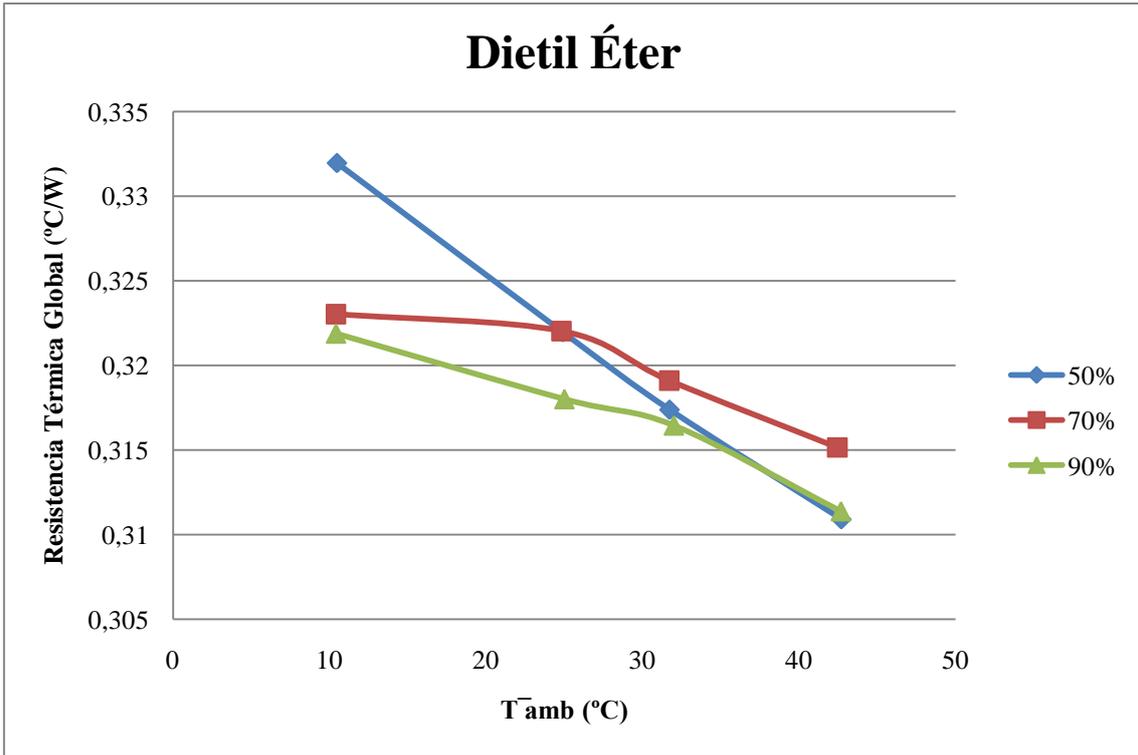
Tabla 6.3-16 Resultado numérico del ensayo con dietil éter al 50%, 150 W y posición vertical.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,41	1702	58,92	50,08	49,51	150,18	0,323	0,059	0,260	0,562
24,82	2666	73,12	64,93	64,14	150,00	0,322	0,055	0,262	0,785
31,70	3204	79,53	71,58	71,05	149,91	0,319	0,053	0,263	0,525
42,44	4222	89,60	82,13	81,50	149,64	0,315	0,050	0,261	0,631

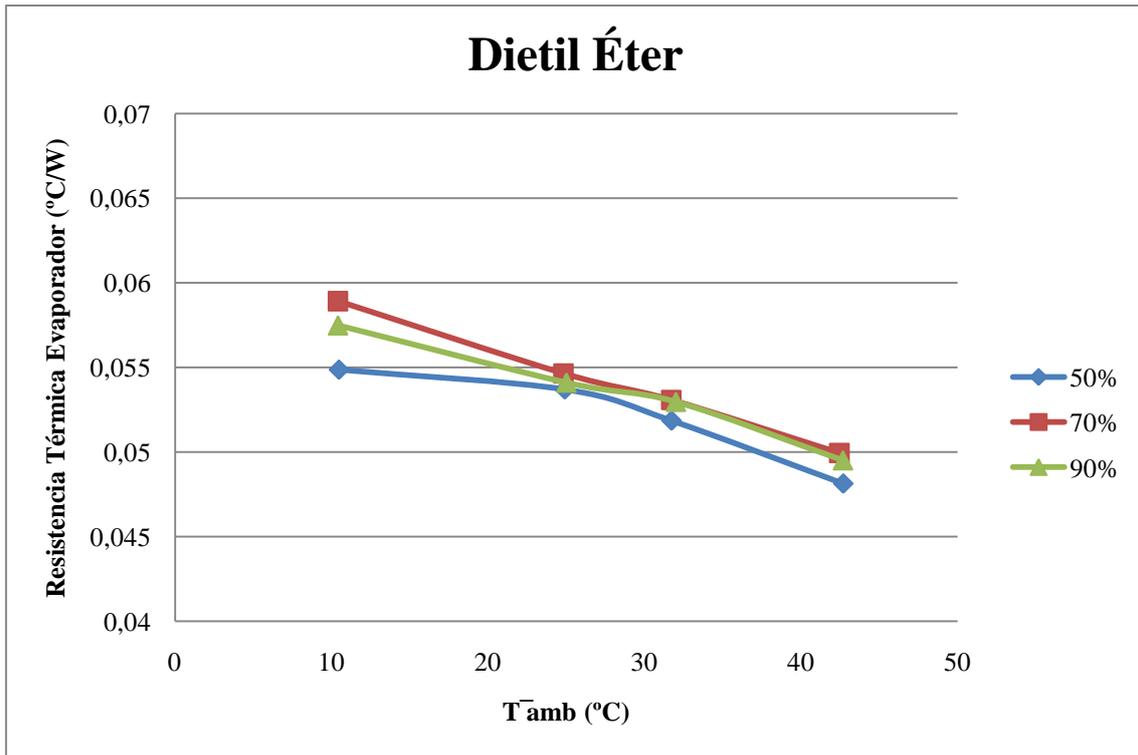
Tabla 6.3-17 Resultado numérico del ensayo con dietil éter al 70%, 150 W y posición vertical.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,41	1708	58,74	50,10	49,57	150,15	0,322	0,057	0,261	0,538
25,01	2642	72,69	64,57	63,98	149,93	0,318	0,054	0,260	0,593
32,00	3195	79,39	71,46	70,94	149,74	0,316	0,053	0,260	0,516
42,68	4198	89,24	81,84	81,26	149,53	0,311	0,050	0,258	0,575

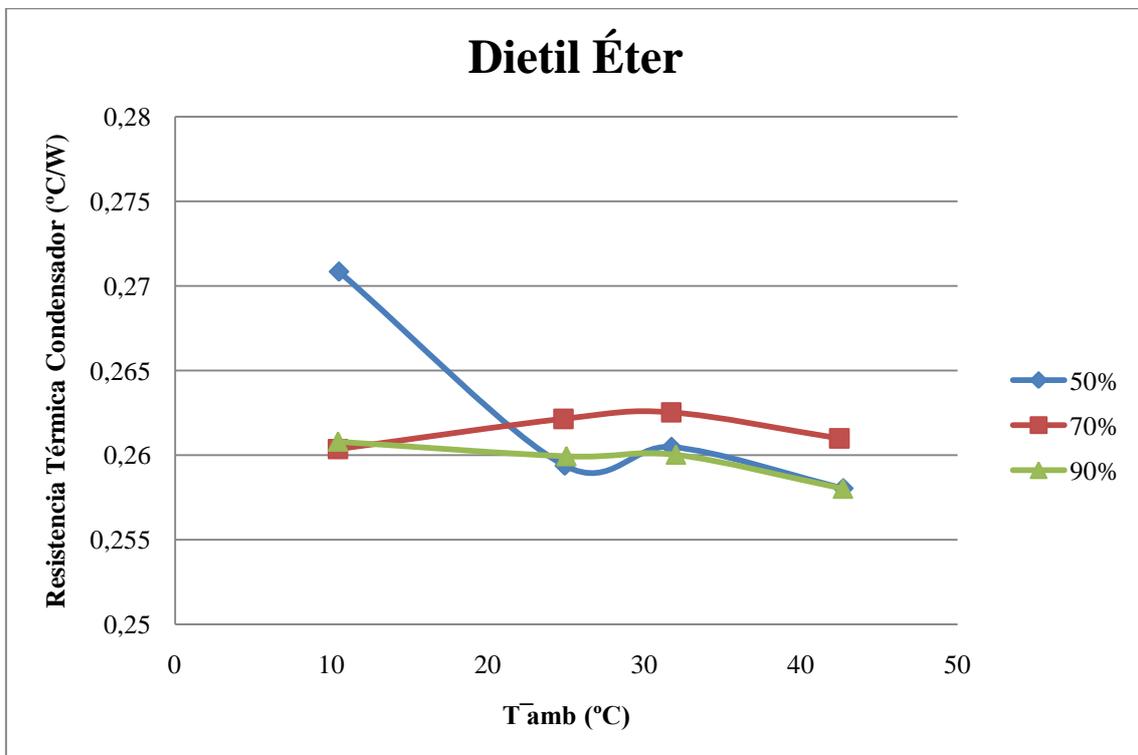
Tabla 6.3-18 Resultado numérico del ensayo con dietil éter al 90%, 150 W y posición vertical.



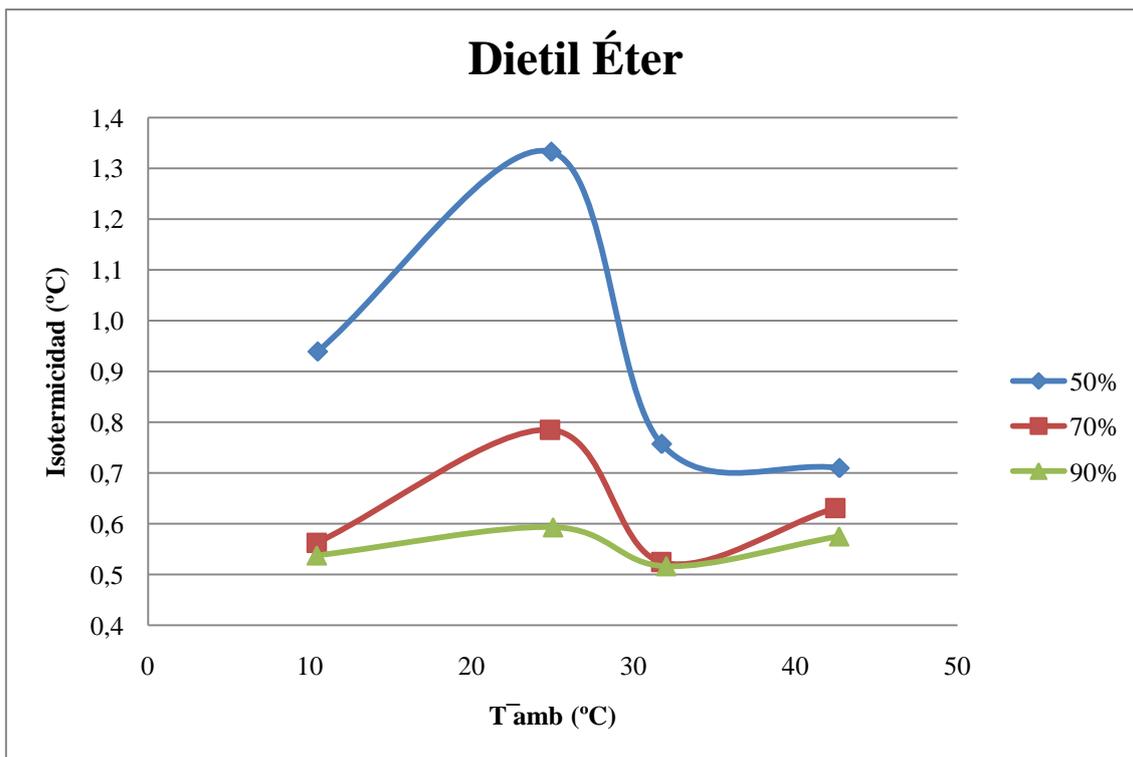
Gráfica 6.3-21 Variación de la resistencia térmica global con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-22 Variación de la resistencia térmica en el evaporador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-23 Variación de la resistencia térmica en el condensador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-24 Variación de la isotermicidad con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.

6.3.7 Fluido de trabajo mezcla Dietil Éter-Formiato de Metilo

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
11,37	2176	59,95	51,21	50,26	150,63	0,322	0,058	0,258	0,953
25,73	3183	72,12	63,75	63,11	150,09	0,309	0,056	0,249	0,644
32,61	3893	78,83	70,77	70,25	150,18	0,308	0,054	0,251	0,523
43,28	5174	89,02	81,44	80,87	150,00	0,305	0,051	0,251	0,569

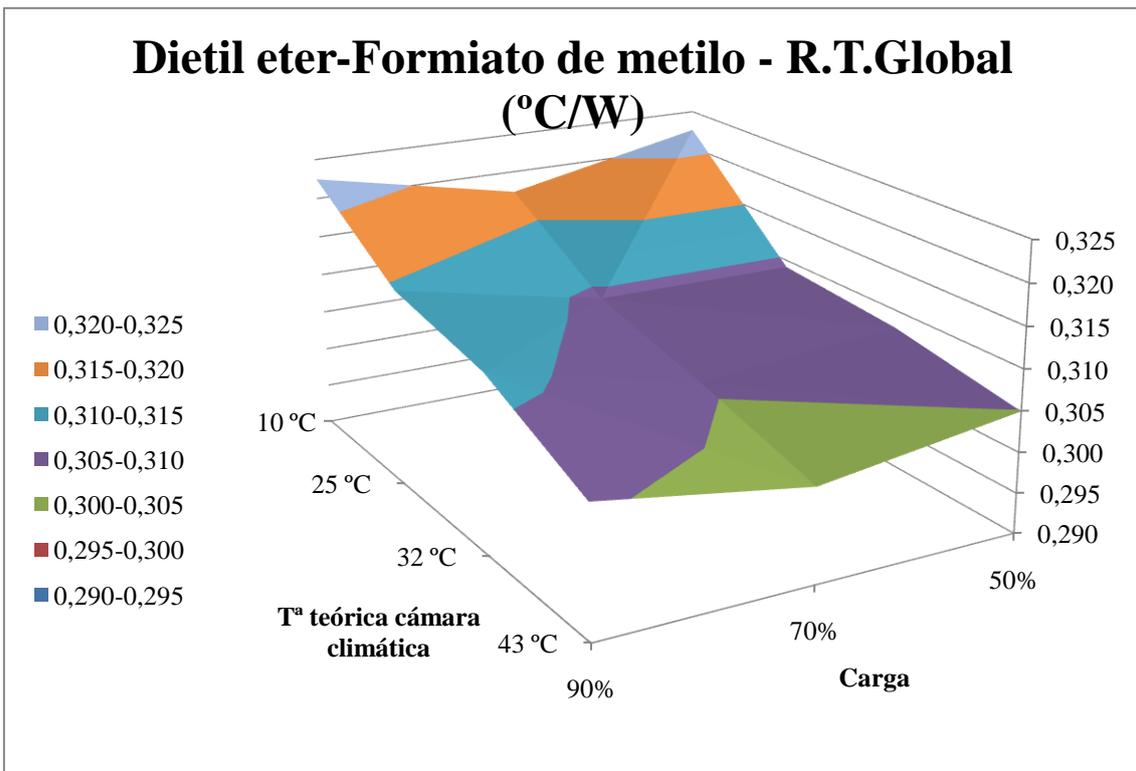
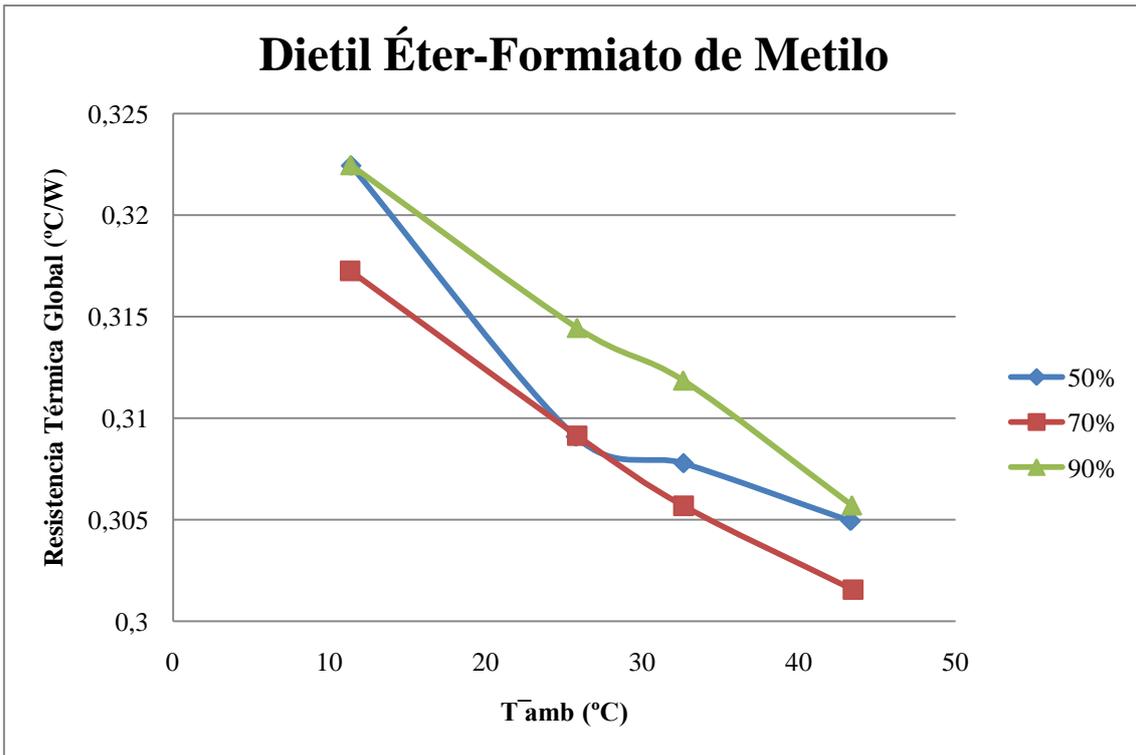
Tabla 6.3-19 Resultado numérico del ensayo con mezcla dietil éter-formiato de metilo al 50%, 150 W y posición vertical.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
11,31	2064	58,88	49,54	48,76	149,93	0,317	0,062	0,250	0,775
25,83	3185	72,01	63,66	63,06	149,38	0,309	0,056	0,249	0,598
32,62	3845	78,31	70,31	69,77	149,48	0,306	0,054	0,249	0,546
43,45	5120	88,47	81,09	80,54	149,29	0,302	0,049	0,248	0,544

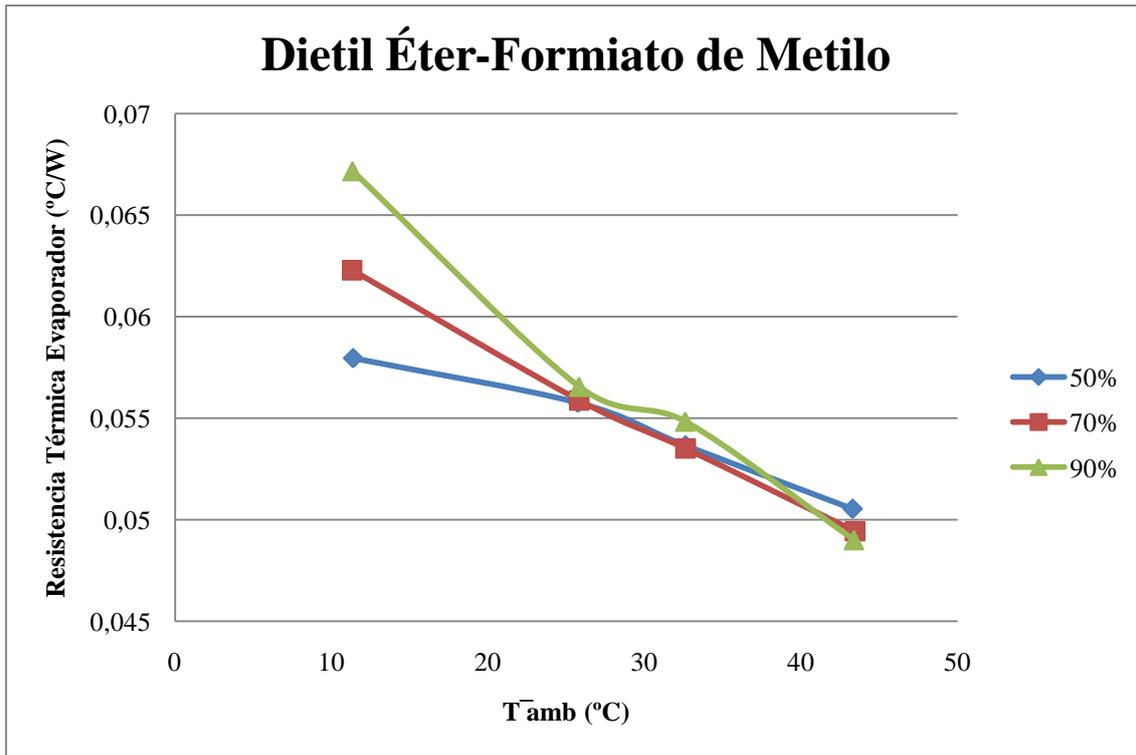
Tabla 6.3-20 Resultado numérico del ensayo con mezcla dietil éter-formiato de metilo al 70%, 150 W y posición vertical.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
11,34	2087	59,98	49,85	49,20	150,84	0,322	0,067	0,251	0,653
25,81	3276	73,03	64,53	63,98	150,15	0,314	0,057	0,254	0,560
32,59	3947	79,47	71,22	70,73	150,30	0,312	0,055	0,254	0,492
43,37	5239	89,28	81,92	81,42	150,16	0,306	0,049	0,253	0,497

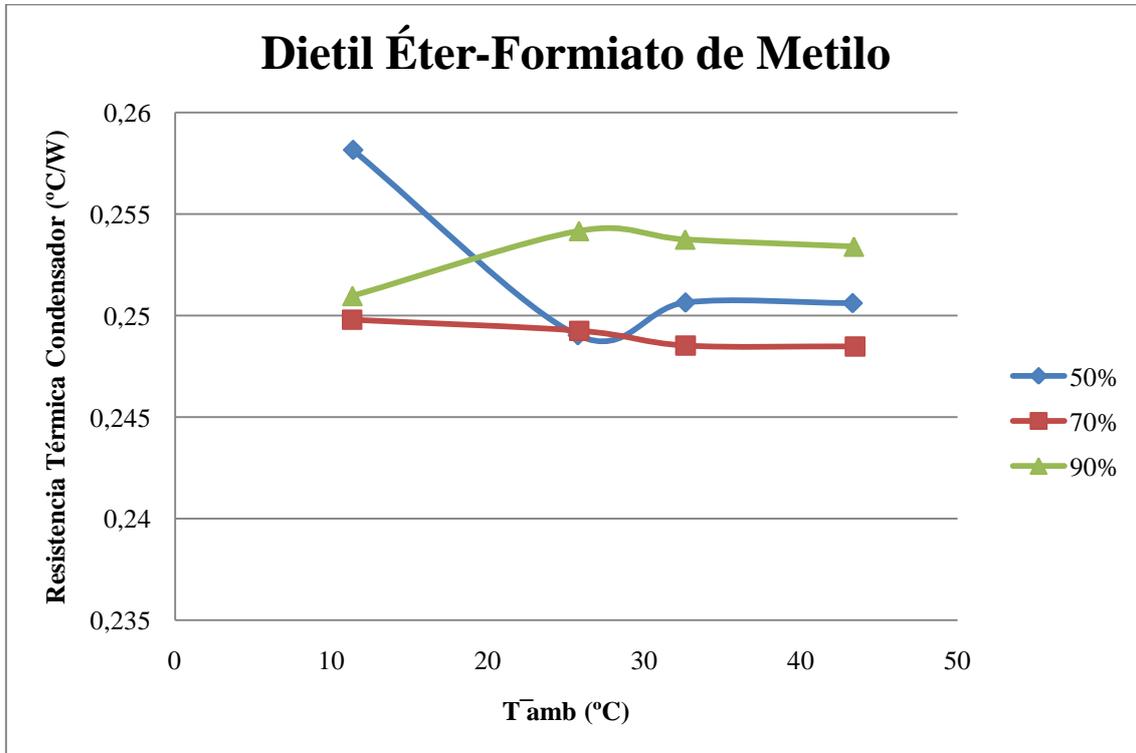
Tabla 6.3-21 Resultado numérico del ensayo con mezcla dietil éter-formiato de metilo al 90%, 150 W y posición vertical.



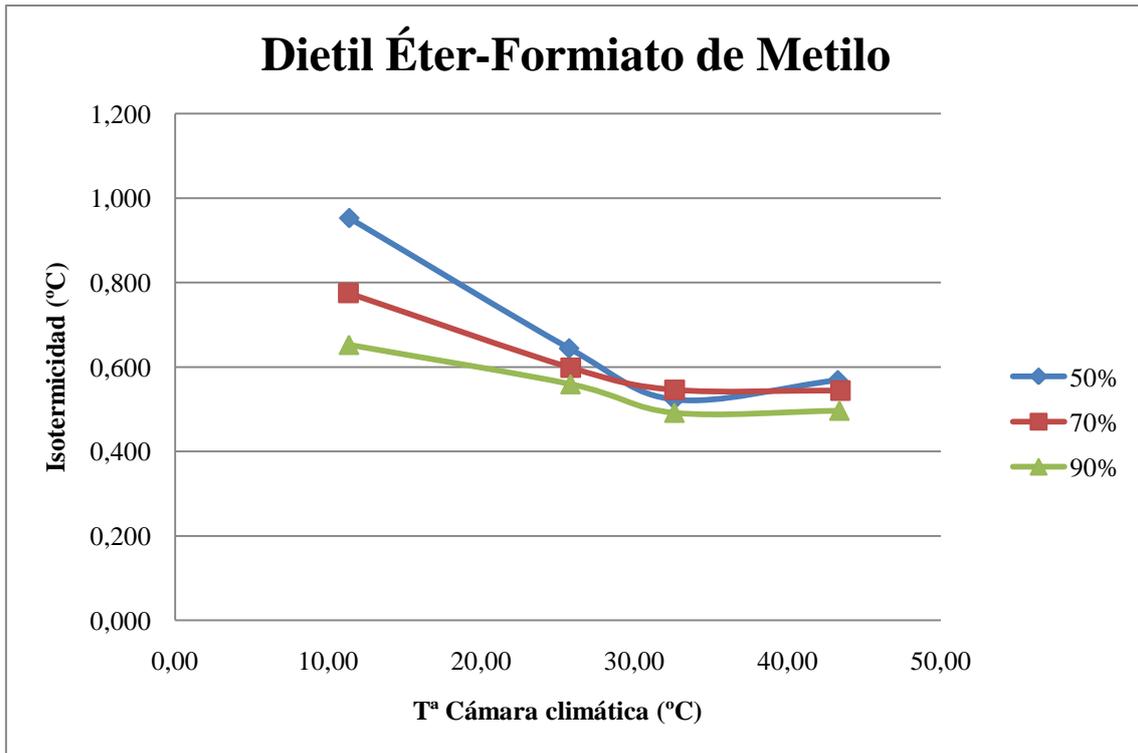
Gráfica 6.3-25 Variación de la resistencia térmica global con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-26 Variación de la resistencia térmica en el evaporador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-27 Variación de la resistencia térmica en el condensador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-28 Variación de la isotermicidad con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.

6.3.8 Fluido de trabajo FC-84

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,44	366	64,90	53,41	49,66	151,00	0,361	0,076	0,260	3,748
24,95	613	77,59	67,28	65,85	150,57	0,350	0,068	0,272	1,427
31,89	792	83,78	74,10	72,76	150,57	0,345	0,064	0,271	1,348
42,84	1114	92,61	84,47	83,02	149,76	0,332	0,054	0,268	1,450

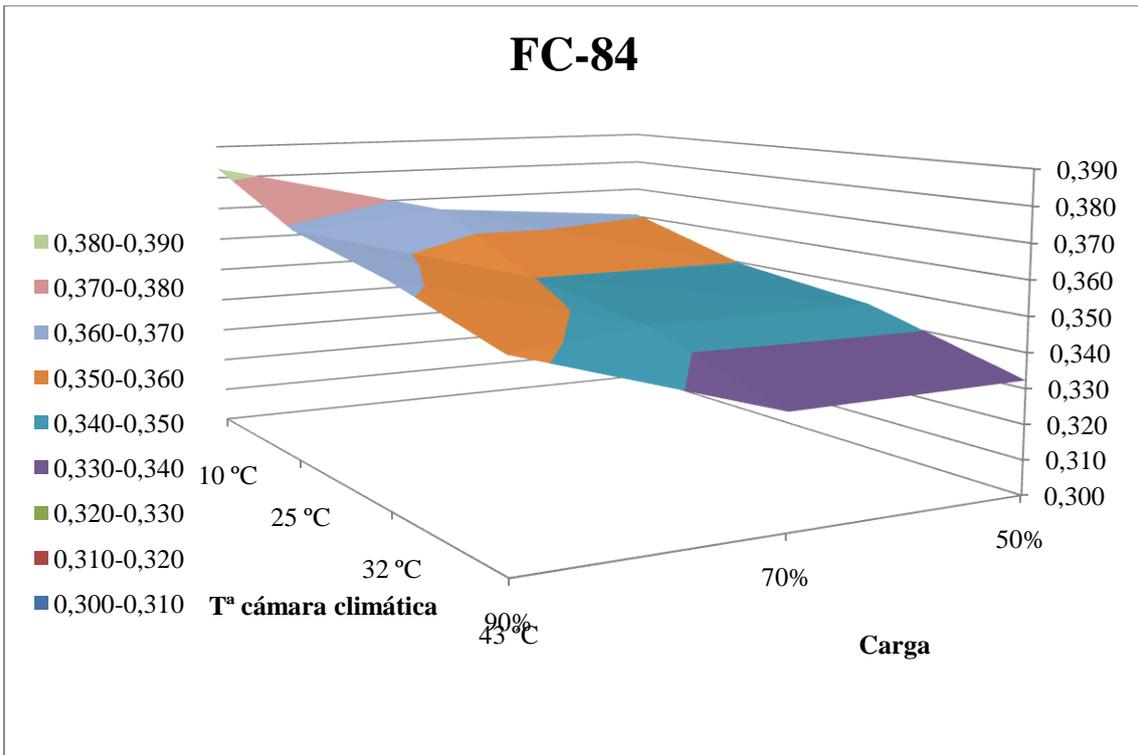
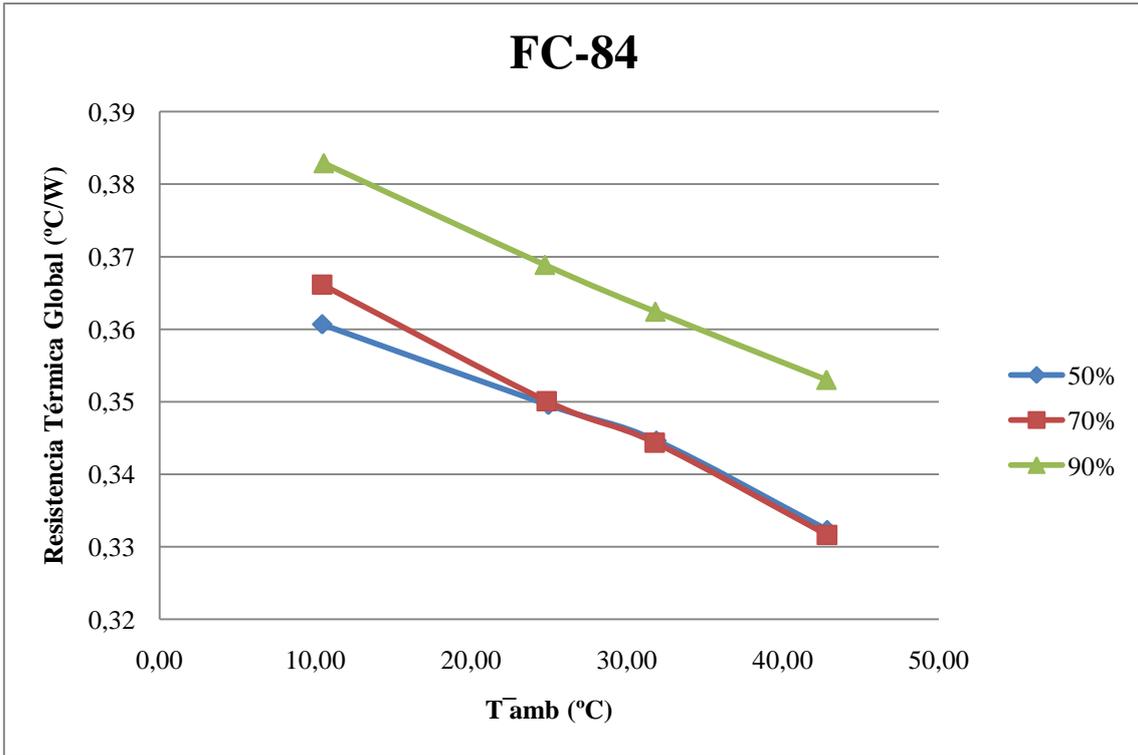
Tabla 6.3-22 Resultado numérico del ensayo con FC-84 al 50%, 150 W y posición vertical.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,42	362	65,62	52,88	47,98	150,77	0,366	0,085	0,249	4,903
24,83	636	77,47	67,78	66,69	150,36	0,350	0,064	0,278	1,085
31,77	810	83,56	74,57	73,30	150,40	0,344	0,060	0,276	1,267
42,83	1132	92,47	84,89	83,38	149,68	0,332	0,051	0,271	1,507

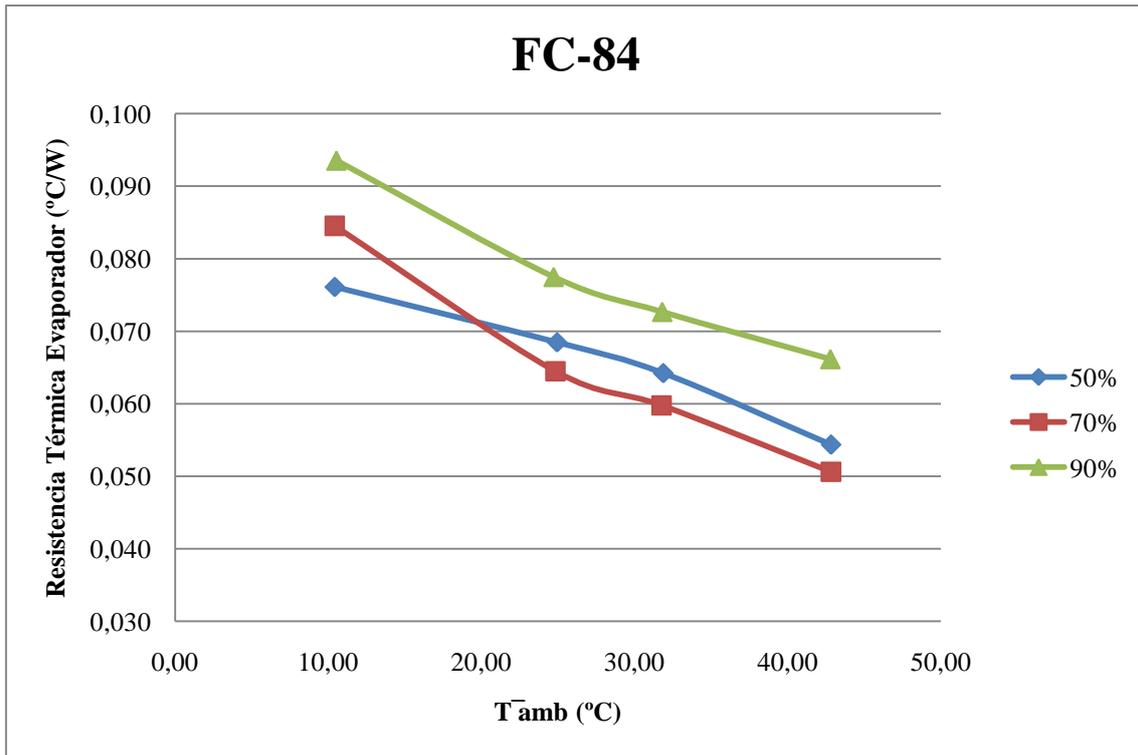
Tabla 6.3-23 Resultado numérico del ensayo con FC-84 al 70%, 150 W y posición vertical.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,54	383	68,30	54,19	46,61	150,84	0,383	0,094	0,239	7,577
24,72	655	80,29	68,62	66,45	150,65	0,369	0,077	0,277	2,170
31,81	832	86,34	75,40	74,23	150,45	0,362	0,073	0,282	1,173
42,79	1164	95,69	85,77	84,72	149,83	0,353	0,066	0,280	1,057

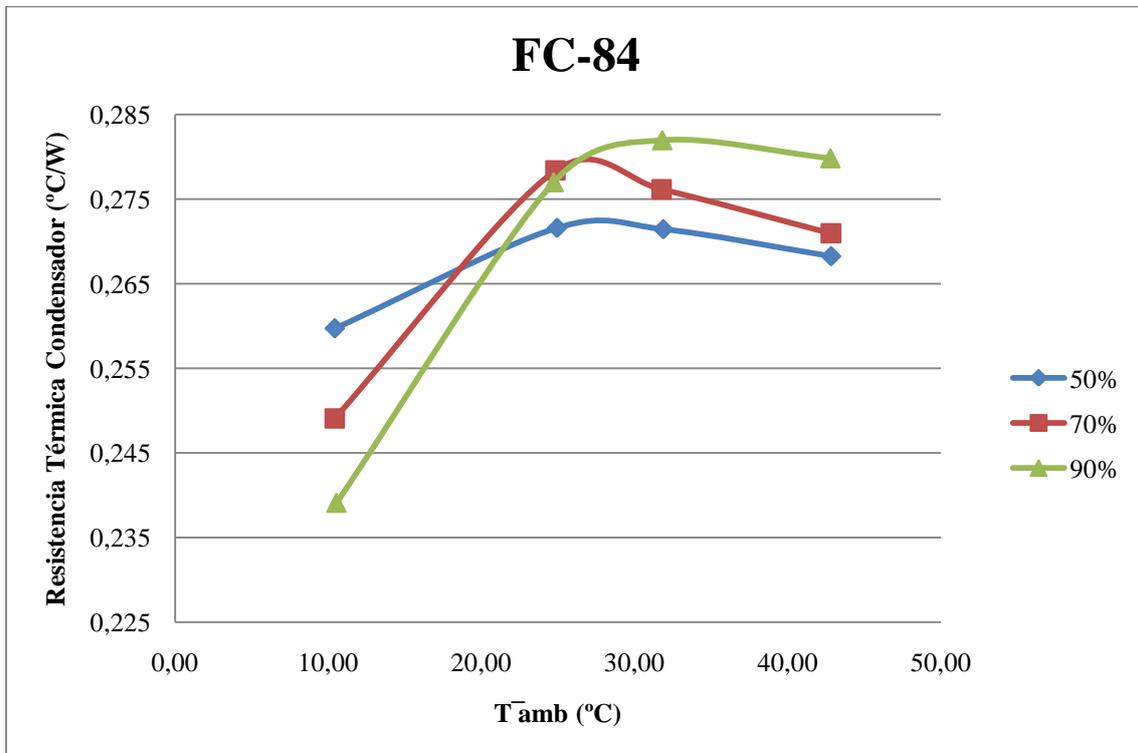
Tabla 6.3-24 Resultado numérico del ensayo con FC-84 al 90%, 150 W y posición vertical.



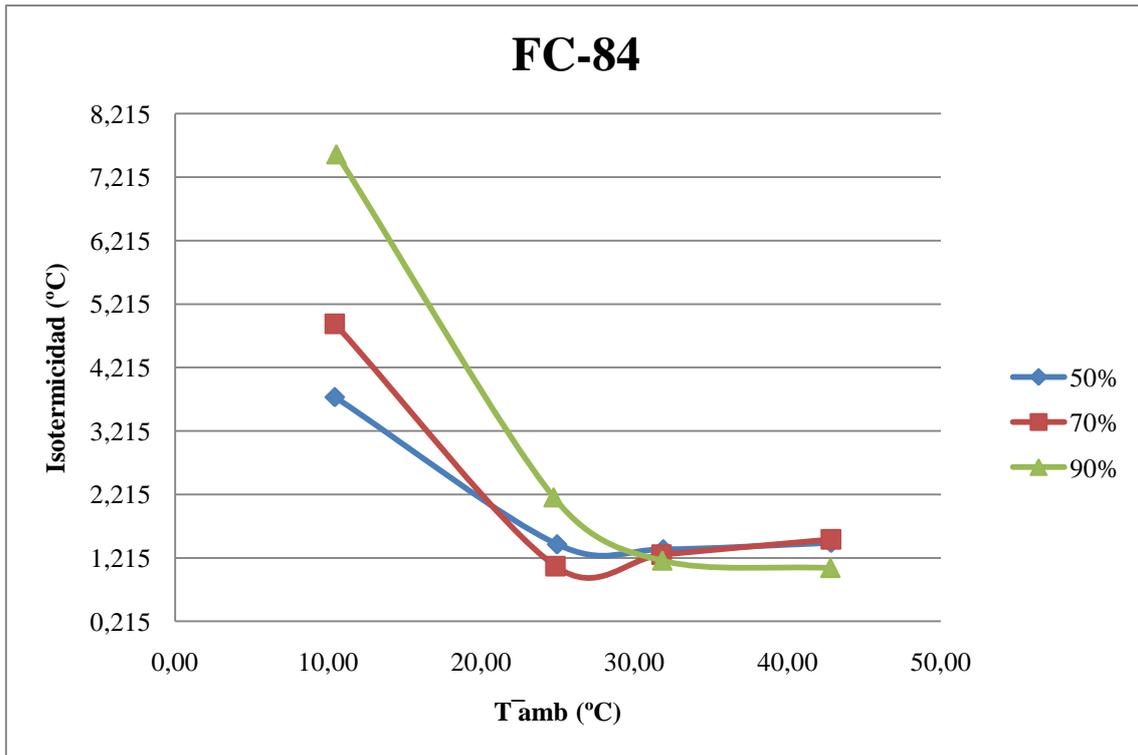
Gráfica 6.3-29 Variación de la resistencia térmica global con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-30 Variación de la resistencia térmica en el evaporador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-31 Variación de la resistencia térmica en el condensador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-32 Variación de la isotermicidad con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.

6.3.9 Fluido de trabajo Formiato de Metilo³

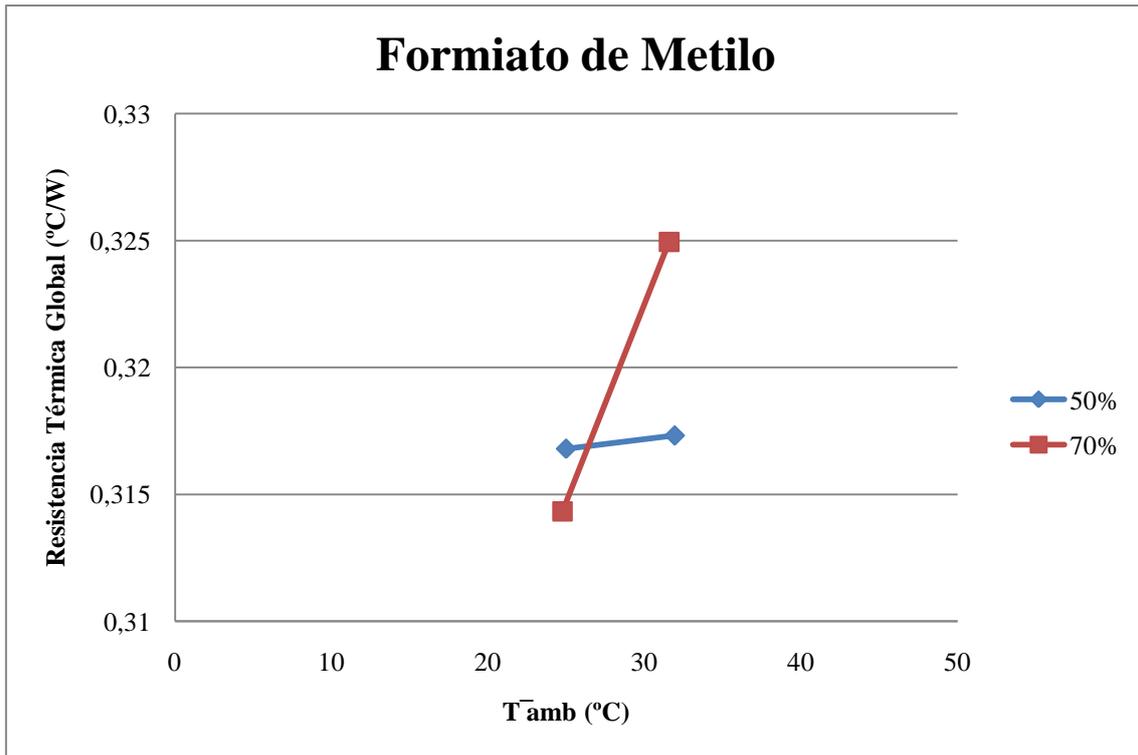
\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
24,98	2904	72,54	63,75	62,68	150,14	0,317	0,059	0,251	1,072
31,93	3545	79,54	70,41	69,49	150,06	0,317	0,061	0,250	0,925

Tabla 6.3-25 Resultado numérico del ensayo con formiato de metilo al 50%, 150 W y posición vertical.

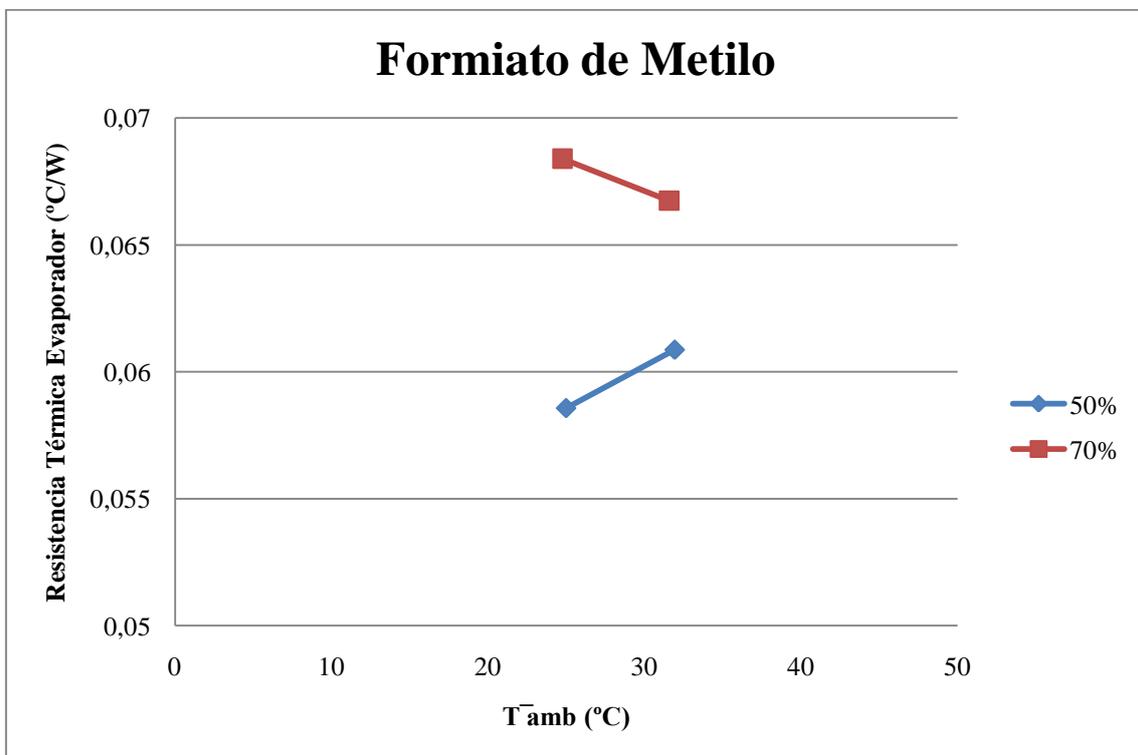
\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
24,76	2783	71,81	61,57	60,66	149,69	0,314	0,068	0,240	0,908
31,57	3582	80,15	70,17	69,39	149,52	0,325	0,067	0,253	0,780

Tabla 6.3-26 Resultado numérico del ensayo con formiato de metilo al 70%, 150 W y posición vertical.

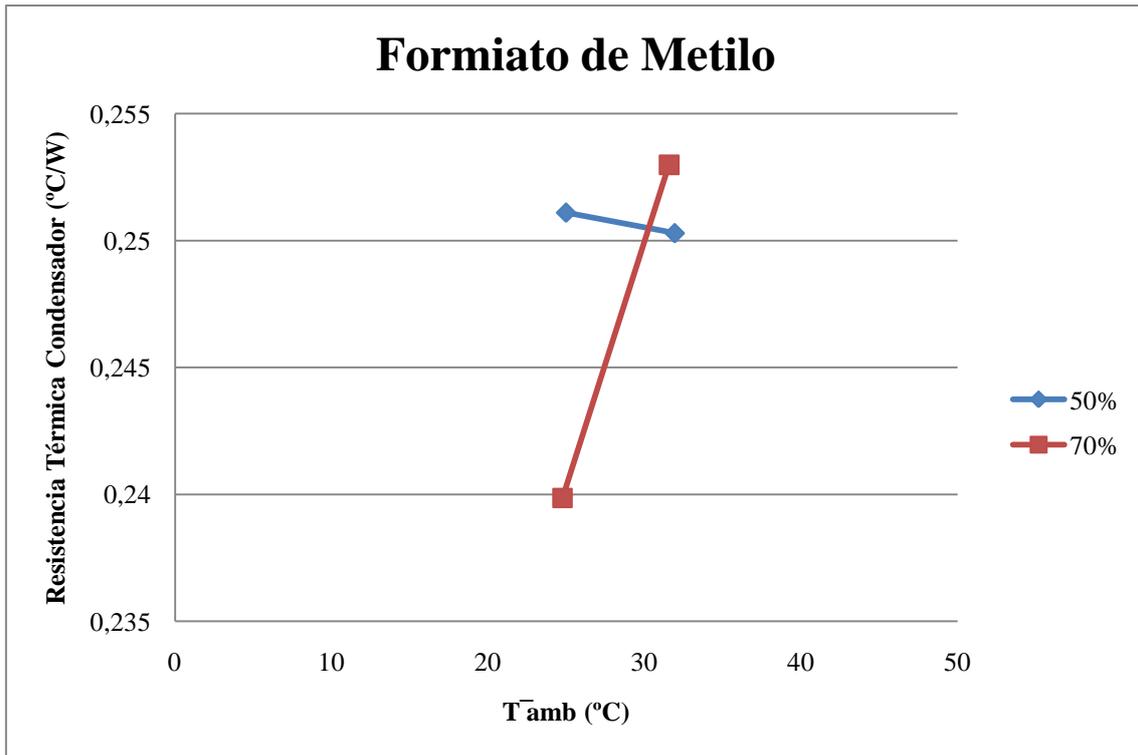
³ En los ensayos con el formiato de metilo no se llegó al estado estacionario para las temperaturas de la cámara climática de 10 °C y 43°C. Además, no se ensayó con carga del 90%, por los problemas para llegar al estado estacionario en las cargas del 50% y del 70%.



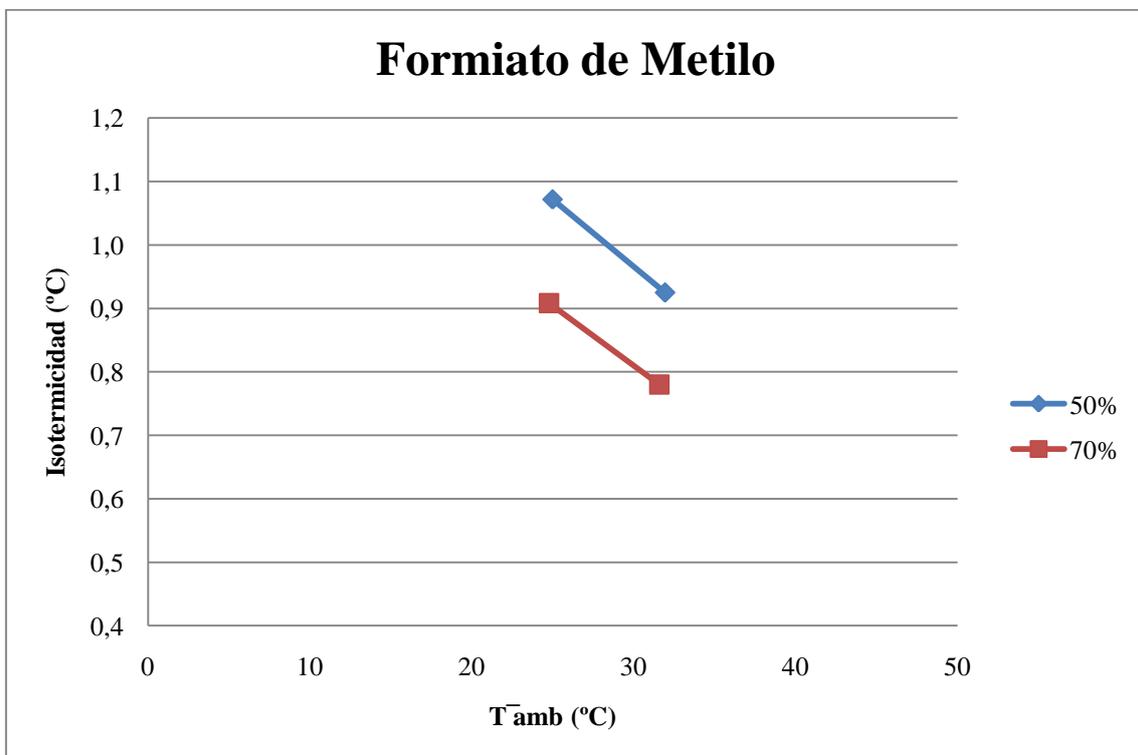
Gráfica 6.3-33 Resistencia térmica global con el formiato de metilo para las cargas 50%, 70%.



Gráfica 6.3-34 Resistencia térmica en el evaporador con el formiato de metilo para las cargas 50%, 70%.



Gráfica 6.3-35 Resistencia térmica en el condensador con el formiato de metilo para las cargas 50%, 70%.



Gráfica 6.3-36 Isothermicidad con el formiato de metilo para las cargas 50%, 70%.

6.3.10 Fluido de trabajo Isopentano

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,46	2016	57,27	48,66	48,21	150,47	0,311	0,057	0,251	0,447
24,80	3053	70,96	63,30	62,97	150,07	0,308	0,051	0,254	0,336
31,73	3647	77,34	70,08	69,80	149,89	0,304	0,048	0,254	0,280
42,66	4753	87,64	80,77	80,52	149,49	0,301	0,046	0,253	0,250

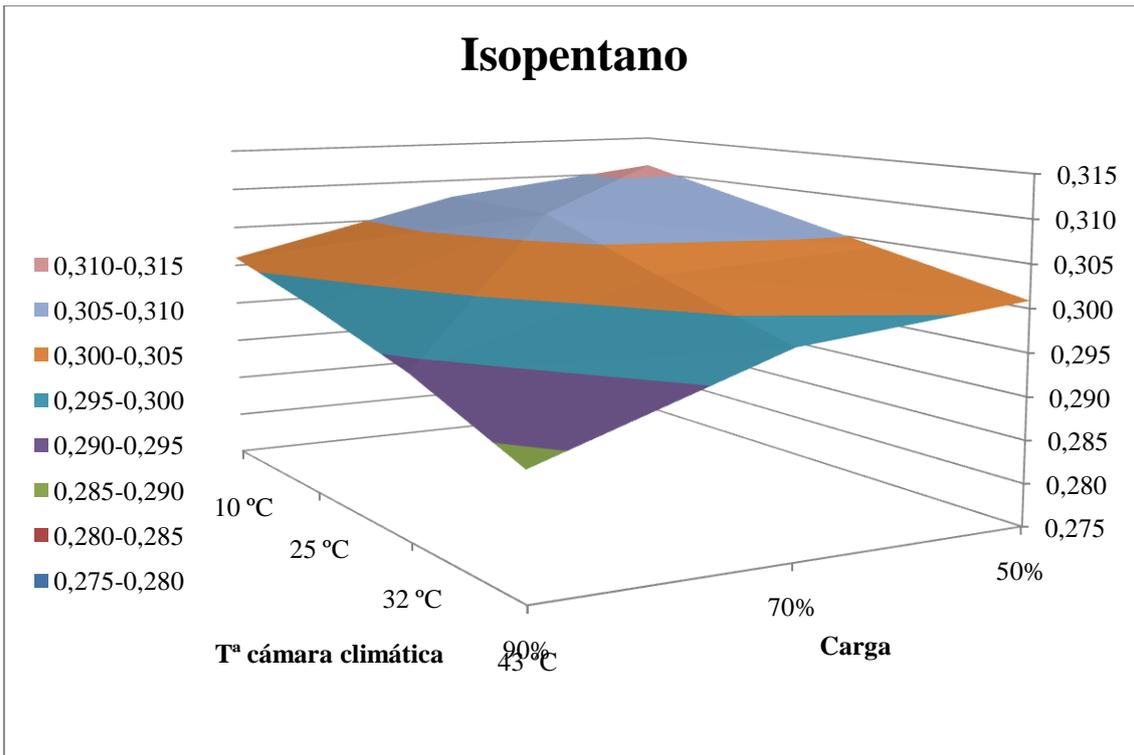
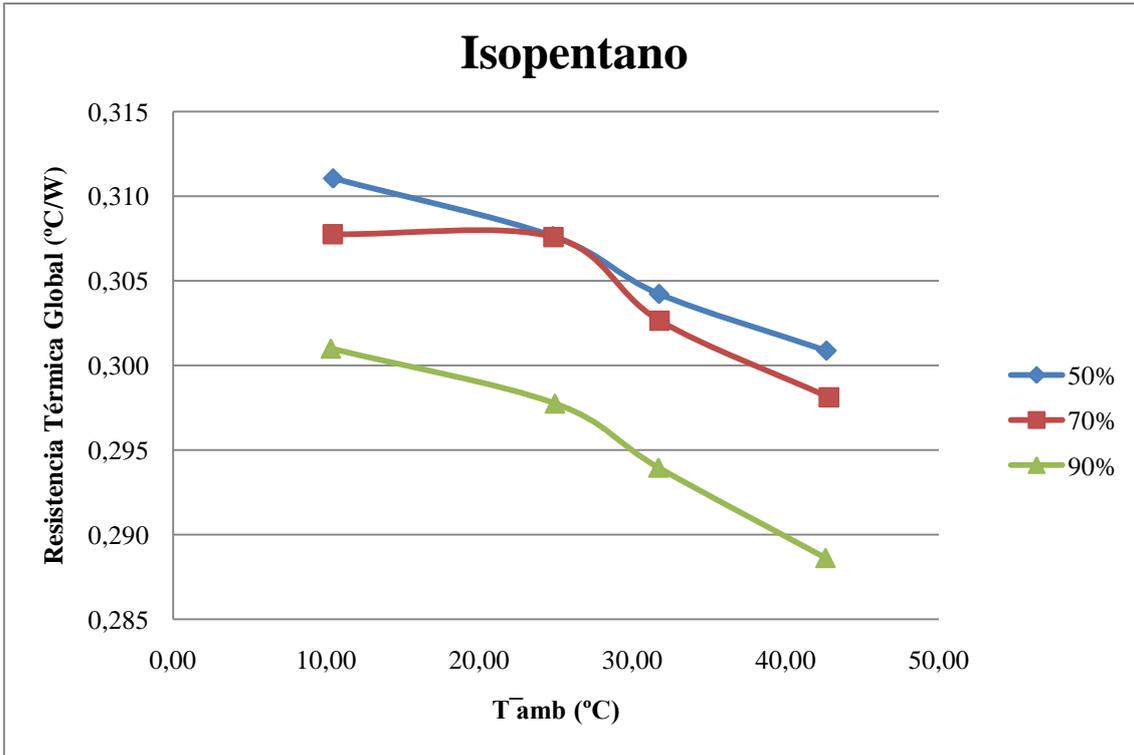
Tabla 6.3-27 Resultado numérico del ensayo con isopentano al 50%, 150 W y posición vertical.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,44	1983	56,73	48,08	47,63	150,44	0,308	0,058	0,247	0,452
24,92	3066	71,06	63,54	63,26	150,00	0,308	0,050	0,256	0,280
31,79	3664	77,16	70,18	70,00	149,93	0,303	0,047	0,255	0,187
42,73	4760	87,24	80,84	80,65	149,32	0,298	0,043	0,254	0,198

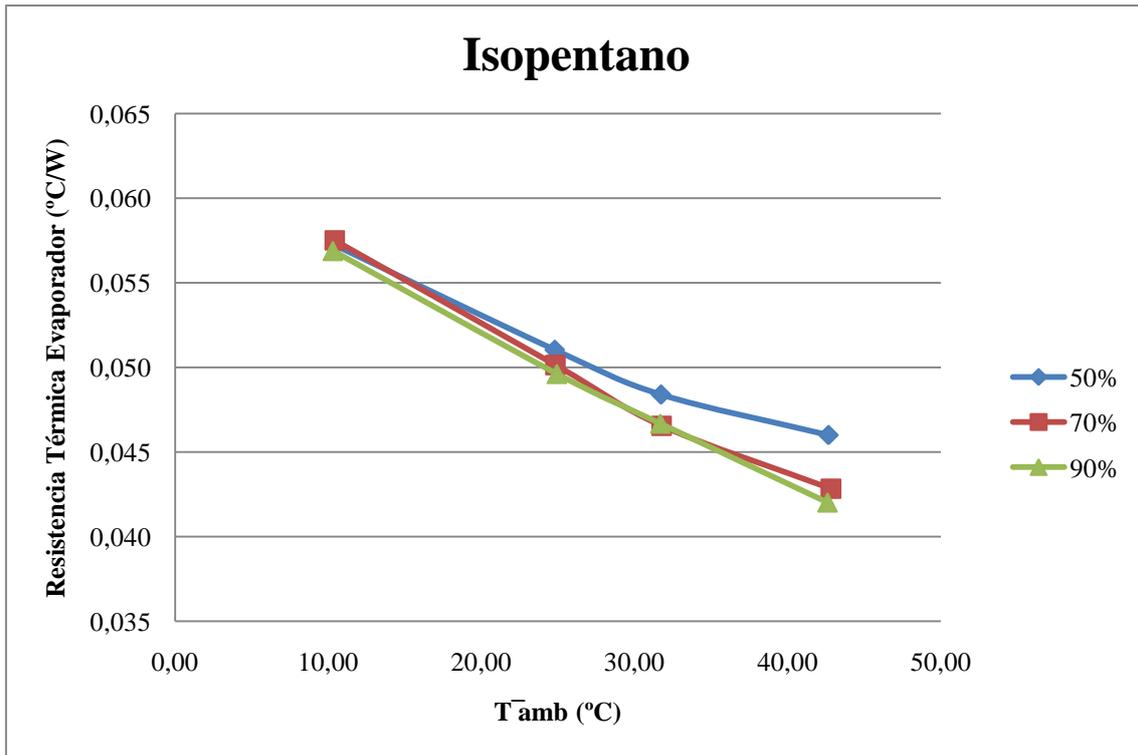
Tabla 6.3-28 Resultado numérico del ensayo con isopentano al 70%, 150 W y posición vertical.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,31	1928	55,61	47,05	46,61	150,51	0,301	0,057	0,241	0,437
24,94	2971	69,64	62,19	61,88	150,14	0,298	0,050	0,246	0,312
31,69	3540	75,78	68,78	68,54	149,98	0,294	0,047	0,246	0,245
42,61	4613	85,79	79,50	79,25	149,60	0,289	0,042	0,245	0,250

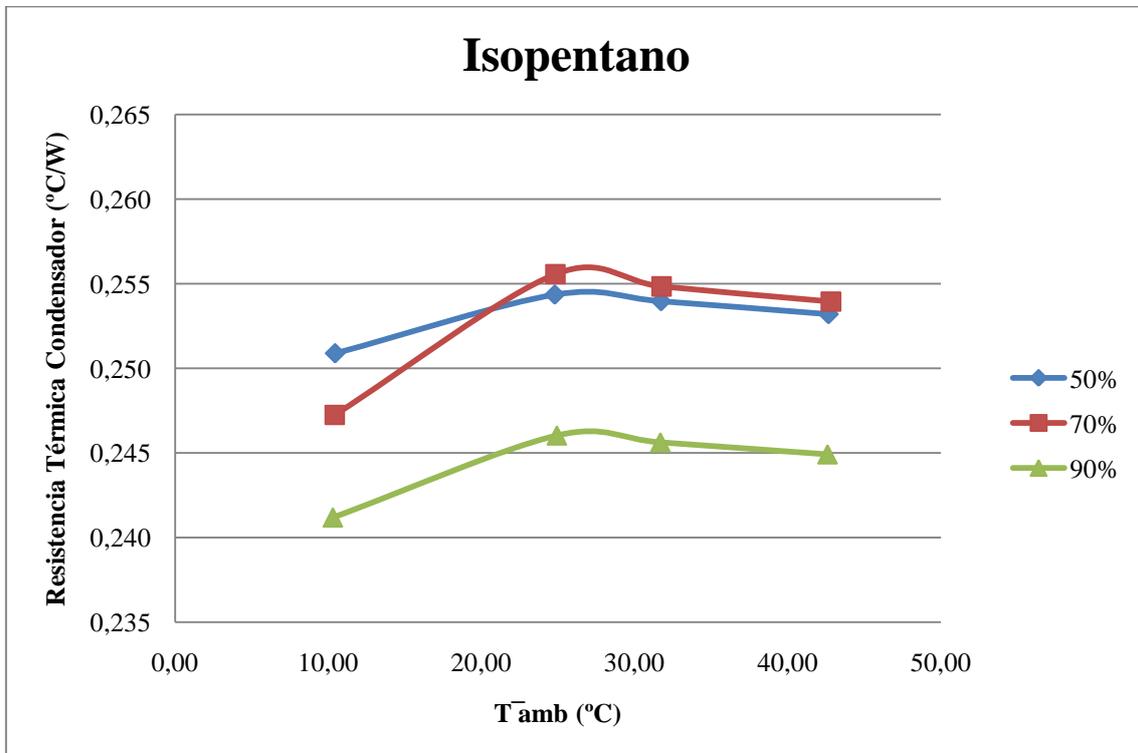
Tabla 6.3-29 Resultado numérico del ensayo con isopentano al 90%, 150 W y posición vertical.



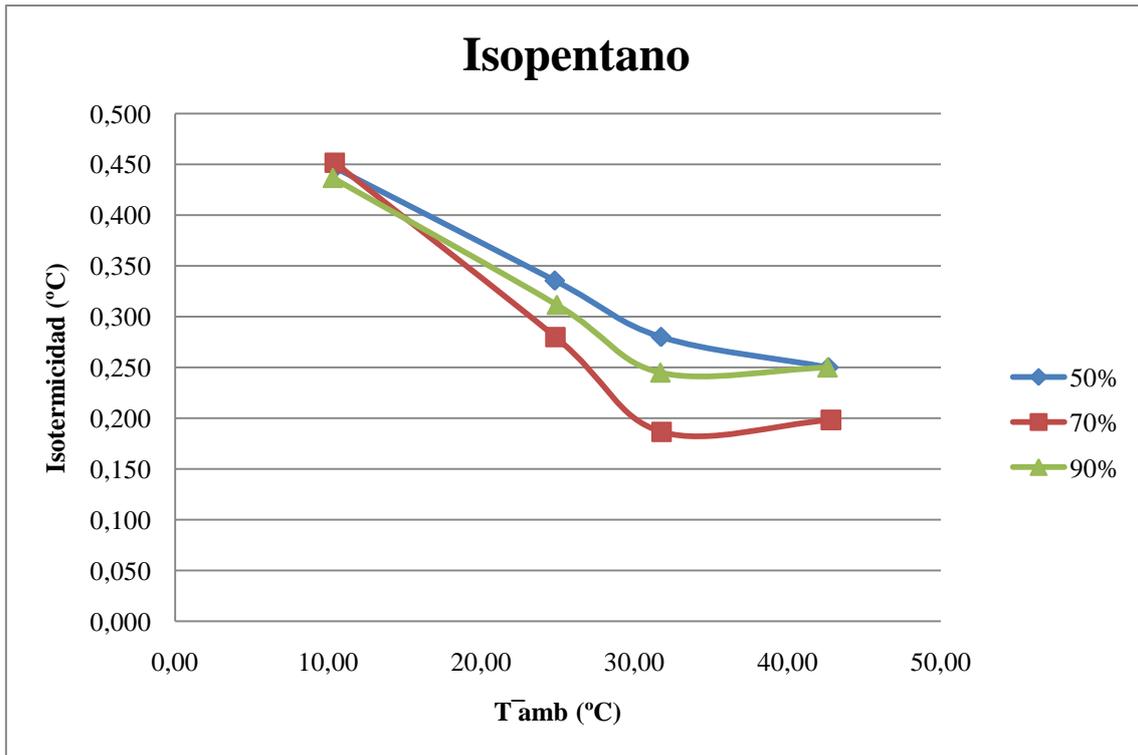
Gráfica 6.3-37 Variación de la resistencia térmica global con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-38 Variación de la resistencia térmica en el evaporador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-39 Variación de la resistencia térmica en el condensador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-40 Variación de la isotermicidad con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.

6.3.11 Fluido de trabajo Metanol

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
11,28	612	62,41	54,11	51,96	150,47	0,340	0,055	0,270	2,154
25,72	1091	76,51	67,99	66,40	149,95	0,339	0,057	0,271	1,592
32,61	1405	83,39	74,62	73,17	149,79	0,339	0,059	0,271	1,452
43,44	2032	94,41	84,84	83,57	149,63	0,341	0,064	0,268	1,270

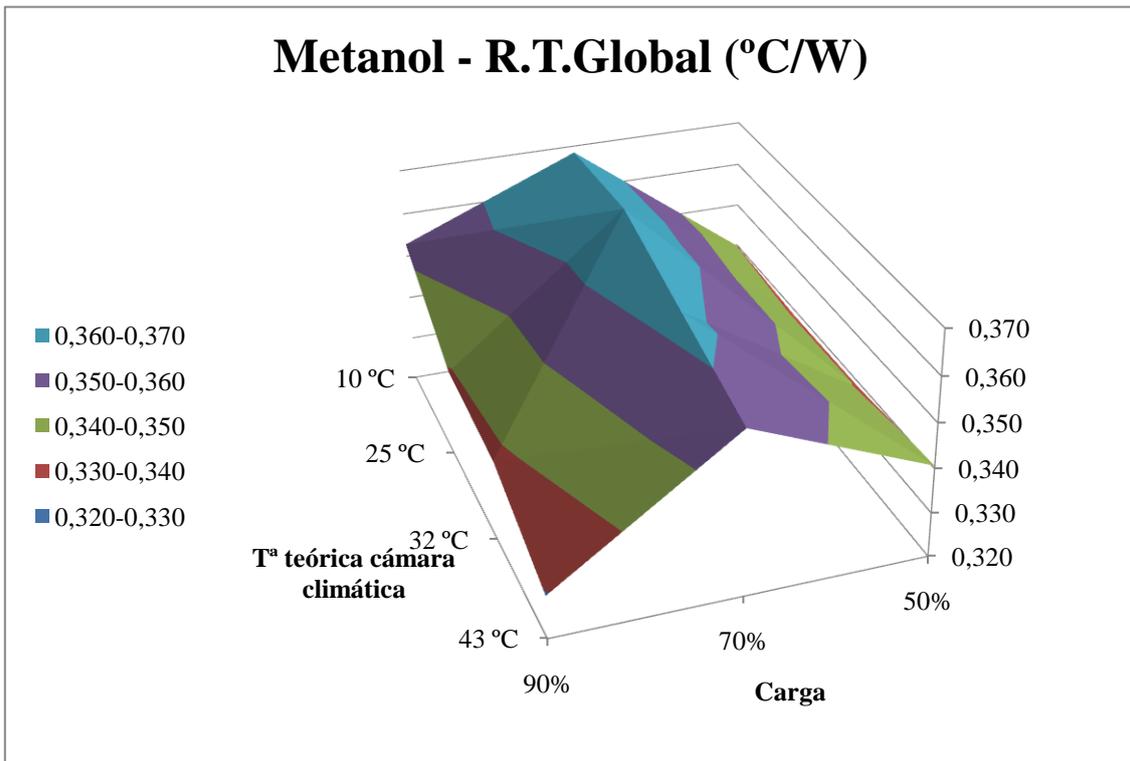
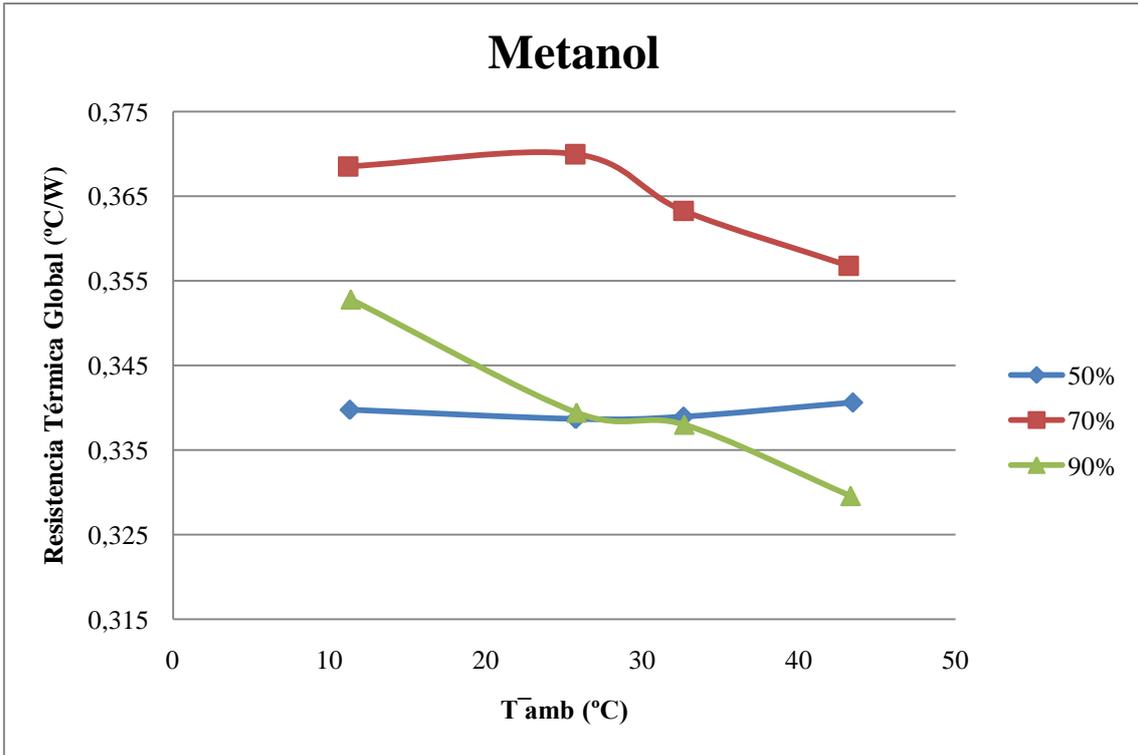
Tabla 6.3-30 Resultado numérico del ensayo con metanol al 50%, 150 W y posición vertical.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
11,19	576	66,52	53,30	50,56	150,13	0,369	0,088	0,262	2,741
25,70	1030	81,10	67,15	64,83	149,74	0,370	0,093	0,261	2,318
32,61	1337	86,91	73,89	71,87	149,46	0,363	0,087	0,263	2,025
43,17	1935	96,47	83,73	82,14	149,39	0,357	0,085	0,261	1,587

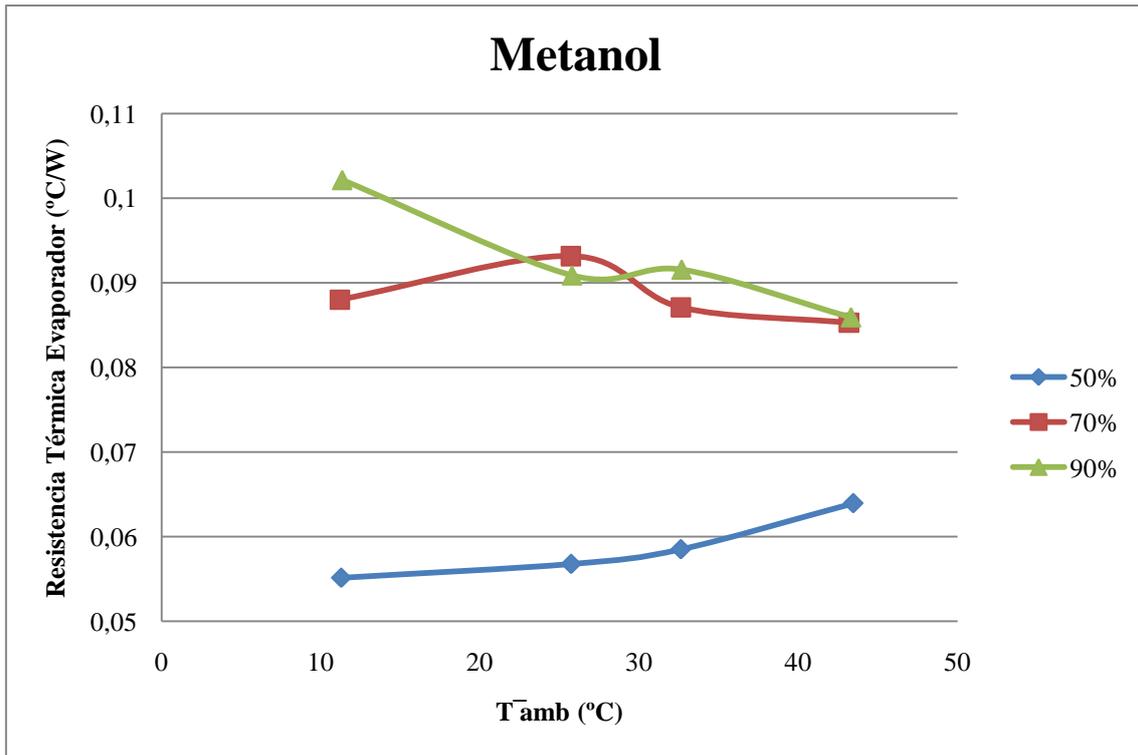
Tabla 6.3-31 Resultado numérico del ensayo con metanol al 70%, 150 W y posición vertical.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
11,35	482,93	64,46	49,08	47,58	150,53	0,353	0,102	0,241	1,502
25,78	879,92	76,73	63,09	61,43	150,09	0,339	0,091	0,238	1,652
32,66	1153,82	83,41	69,66	68,34	150,14	0,338	0,092	0,238	1,323
43,30	1690,52	92,68	79,80	78,62	149,84	0,330	0,086	0,236	1,182

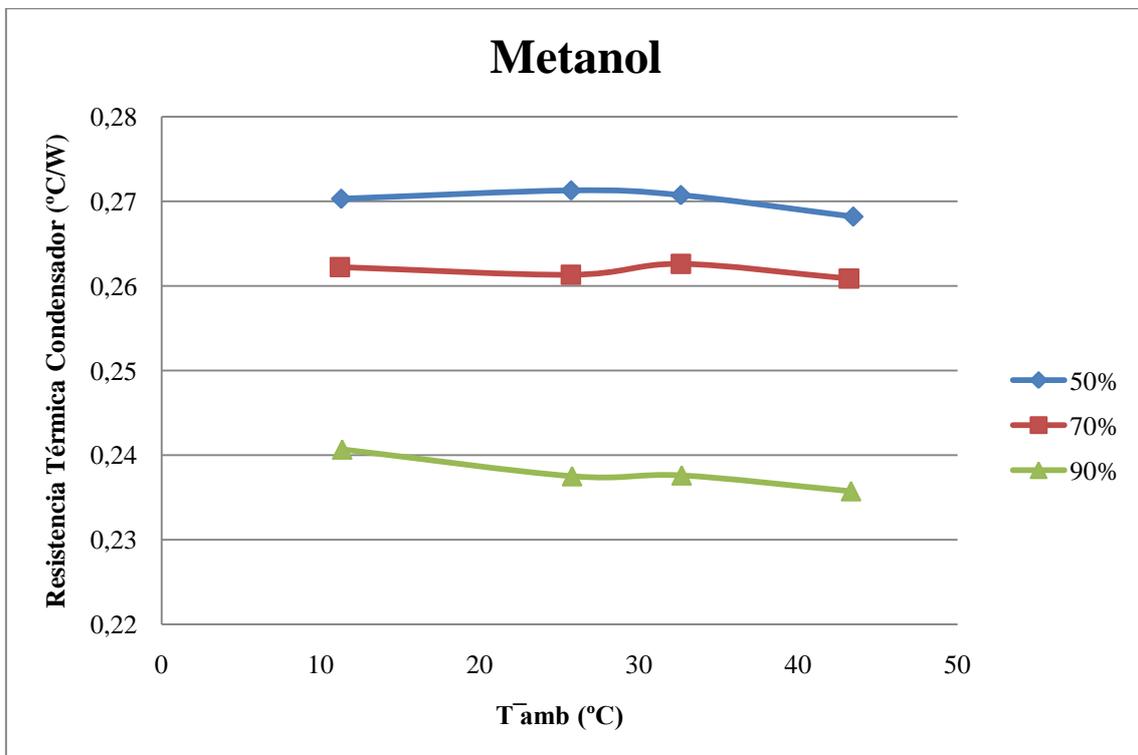
Tabla 6.3-32 Resultado numérico del ensayo con metanol al 90%, 150 W y posición vertical.



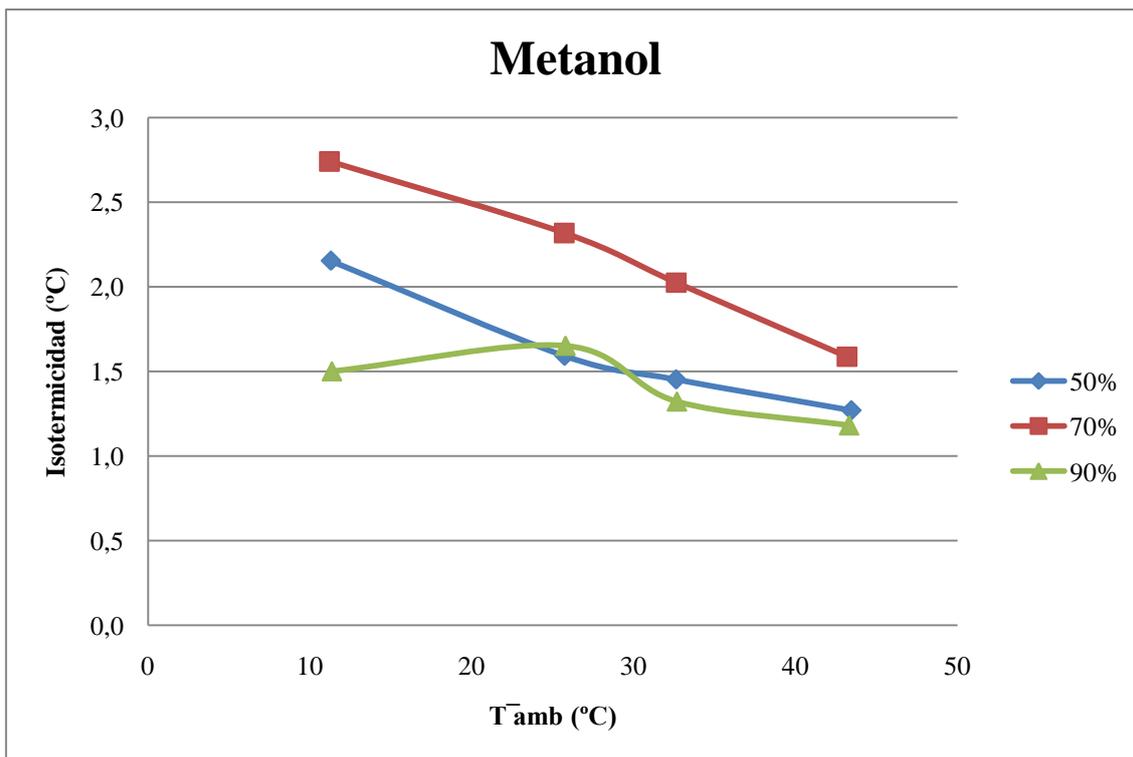
Gráfica 6.3-41 Variación de la resistencia térmica global con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-42 Variación de la resistencia térmica en el evaporador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-43 Variación de la resistencia térmica en el condensador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-44 Variación de la isotermicidad con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.

6.3.12 Fluido de trabajo N-Hexano

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,54	619	64,85	55,16	33,83	151,50	0,359	0,064	0,154	21,335
24,68	972	78,16	68,45	54,04	149,73	0,357	0,065	0,196	14,410
31,56	1192	84,40	74,81	63,67	149,62	0,353	0,064	0,215	11,133
42,52	1628	94,61	85,43	78,40	149,40	0,349	0,061	0,240	7,028

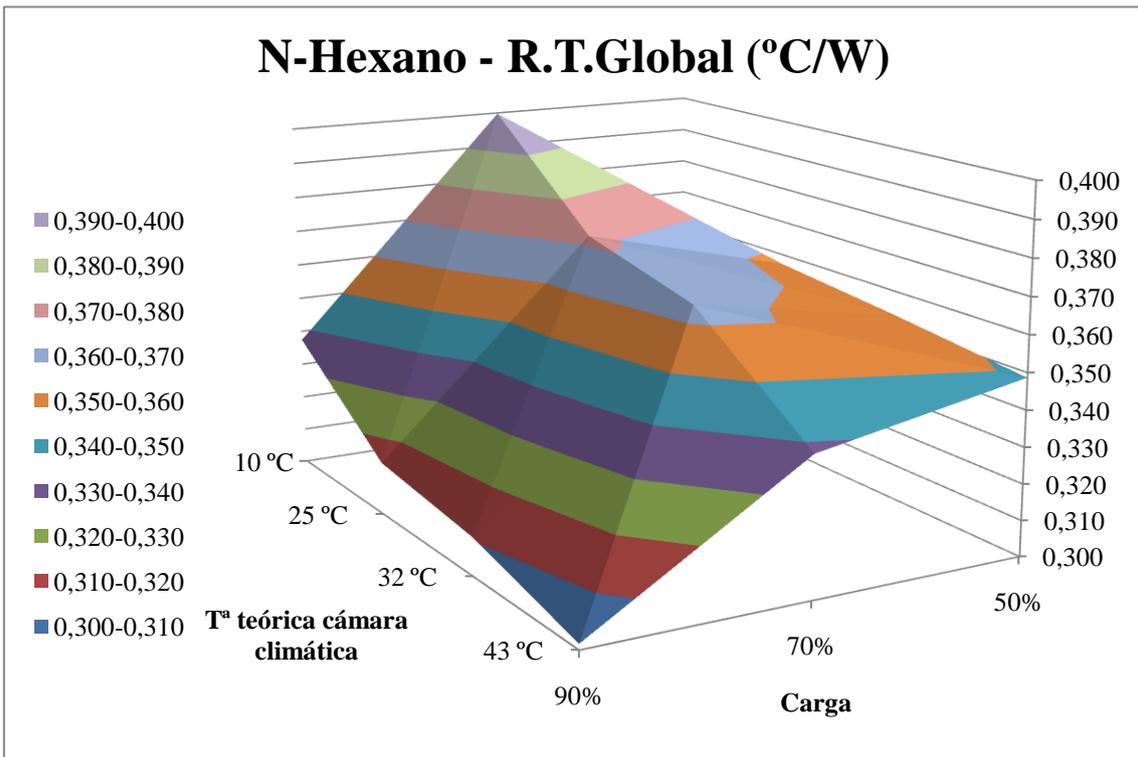
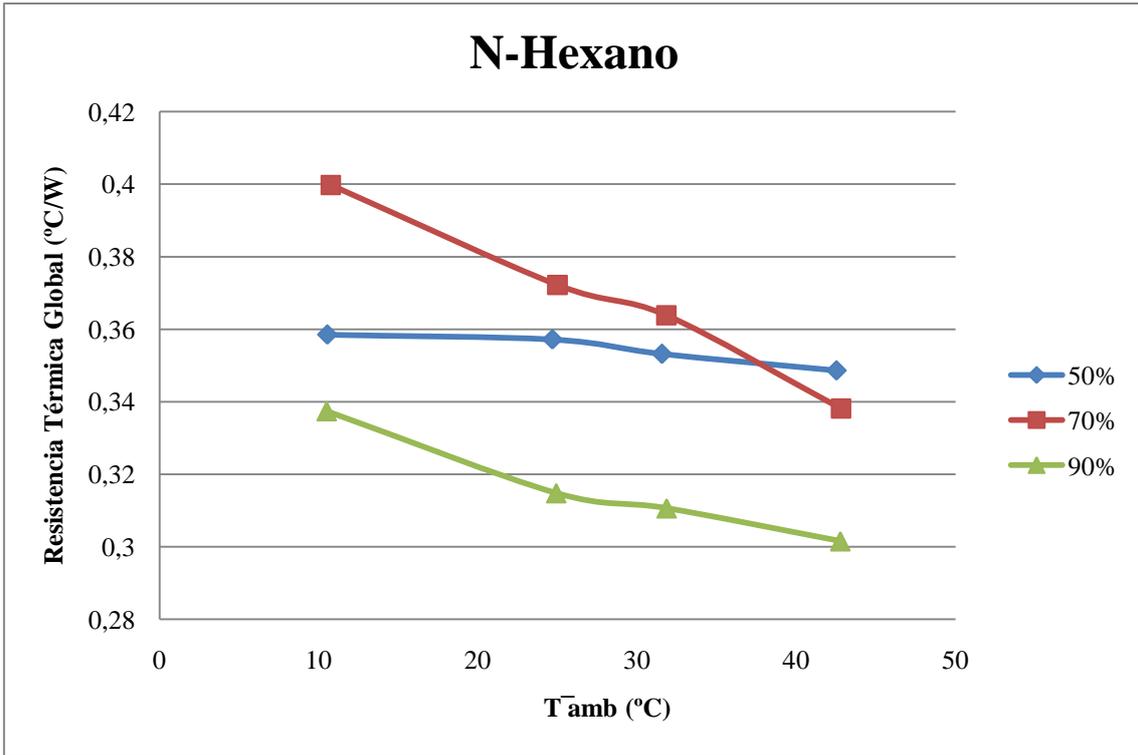
Tabla 6.3-33 Resultado numérico del ensayo con N-hexano al 50%, 150 W y posición vertical.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,75	655	70,82	56,54	37,50	150,26	0,400	0,095	0,178	19,035
24,99	945	80,82	67,25	53,08	150,01	0,372	0,090	0,187	14,170
31,83	1162	86,38	73,77	62,69	149,91	0,364	0,084	0,206	11,081
42,80	1585	93,42	84,30	77,25	149,70	0,338	0,061	0,230	7,046

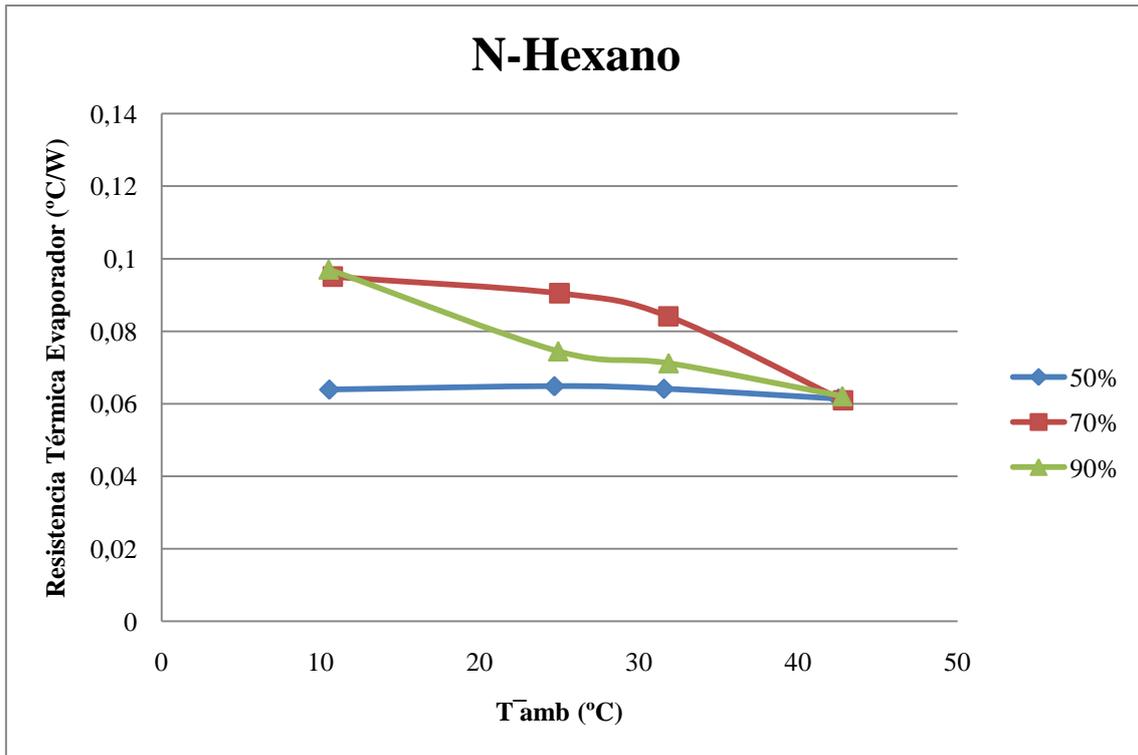
Tabla 6.3-34 Resultado numérico del ensayo con N-hexano al 70%, 150 W y posición vertical.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,49	450	61,20	46,61	45,92	150,31	0,337	0,097	0,236	0,693
24,91	761	72,13	60,96	60,20	150,02	0,315	0,074	0,235	0,756
31,84	955	78,40	67,72	67,21	149,87	0,311	0,071	0,236	0,518
42,75	1335	87,89	78,59	78,05	149,68	0,302	0,062	0,236	0,547

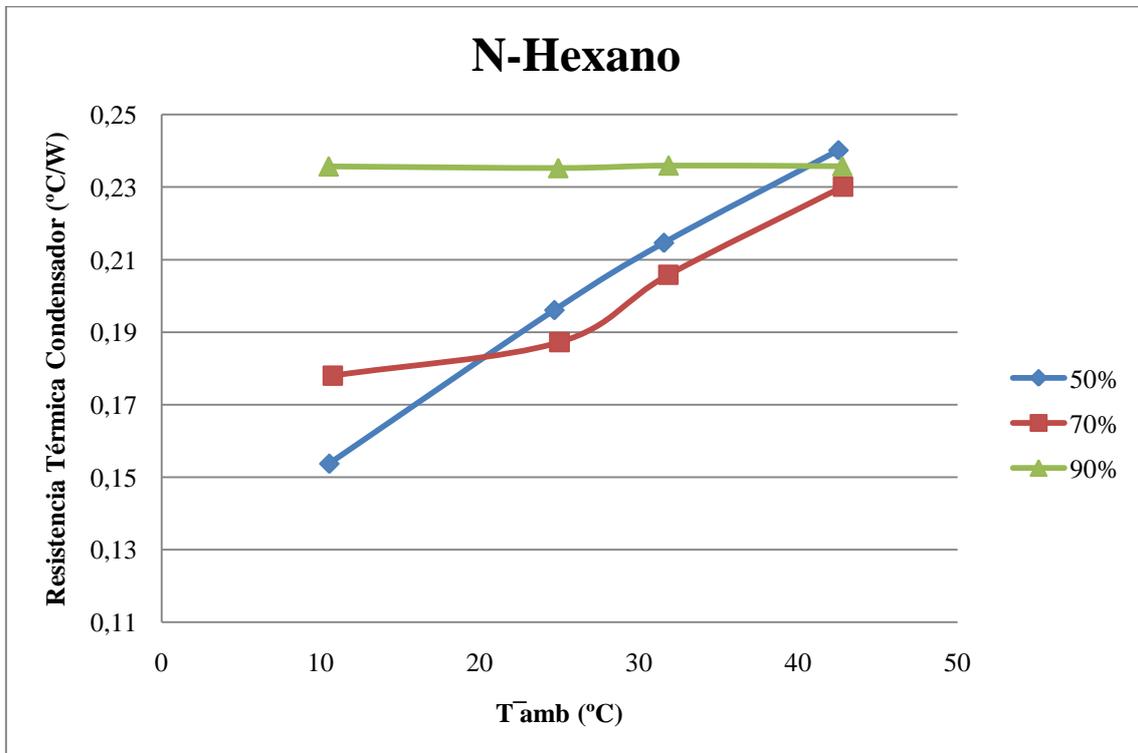
Tabla 6.3-35 Resultado numérico del ensayo con N-hexano al 90%, 150 W y posición vertical.



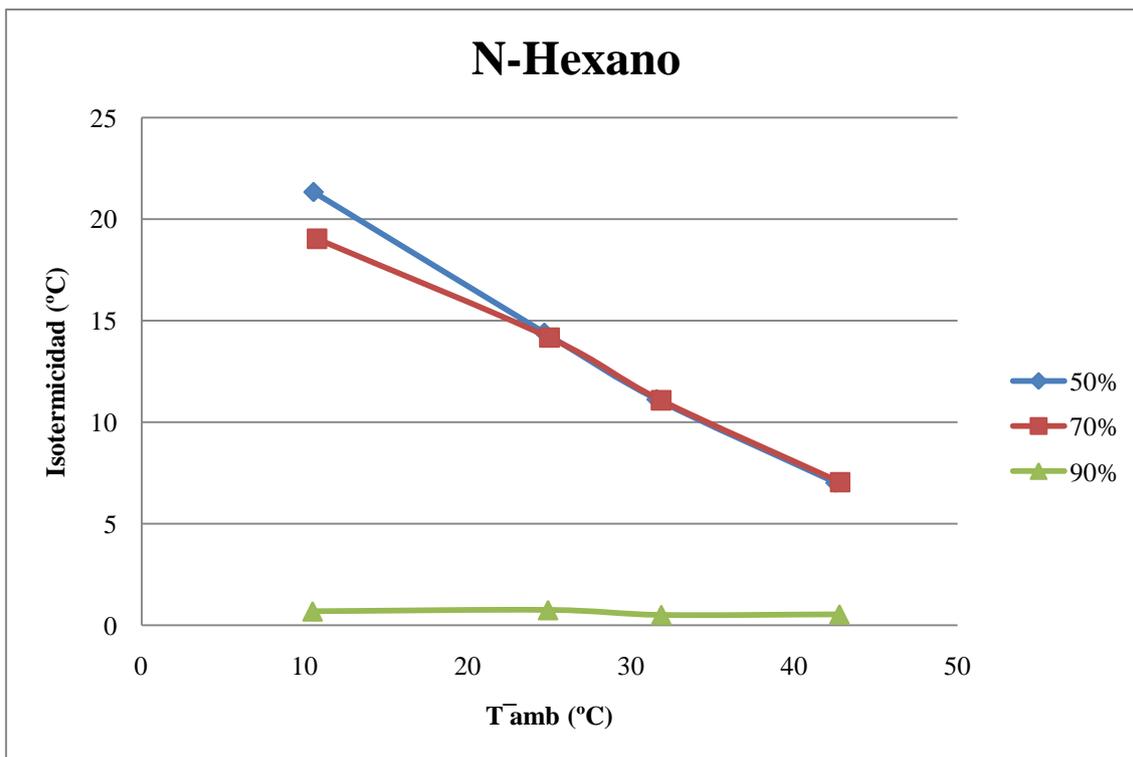
Gráfica 6.3-45 Variación de la resistencia térmica global con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-46 Variación de la resistencia térmica en el evaporador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-47 Variación de la resistencia térmica en el condensador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-48 Variación de la isothermicidad con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.

6.3.13 Fluido de trabajo N-Pentano

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,40	1556	58,31	49,81	49,13	150,16	0,319	0,057	0,258	0,675
25,00	2478	73,51	65,33	64,83	149,85	0,324	0,055	0,266	0,498
31,80	2968	79,68	71,97	71,65	149,68	0,320	0,052	0,266	0,320
42,79	3900	89,96	82,63	82,33	149,51	0,315	0,049	0,264	0,298

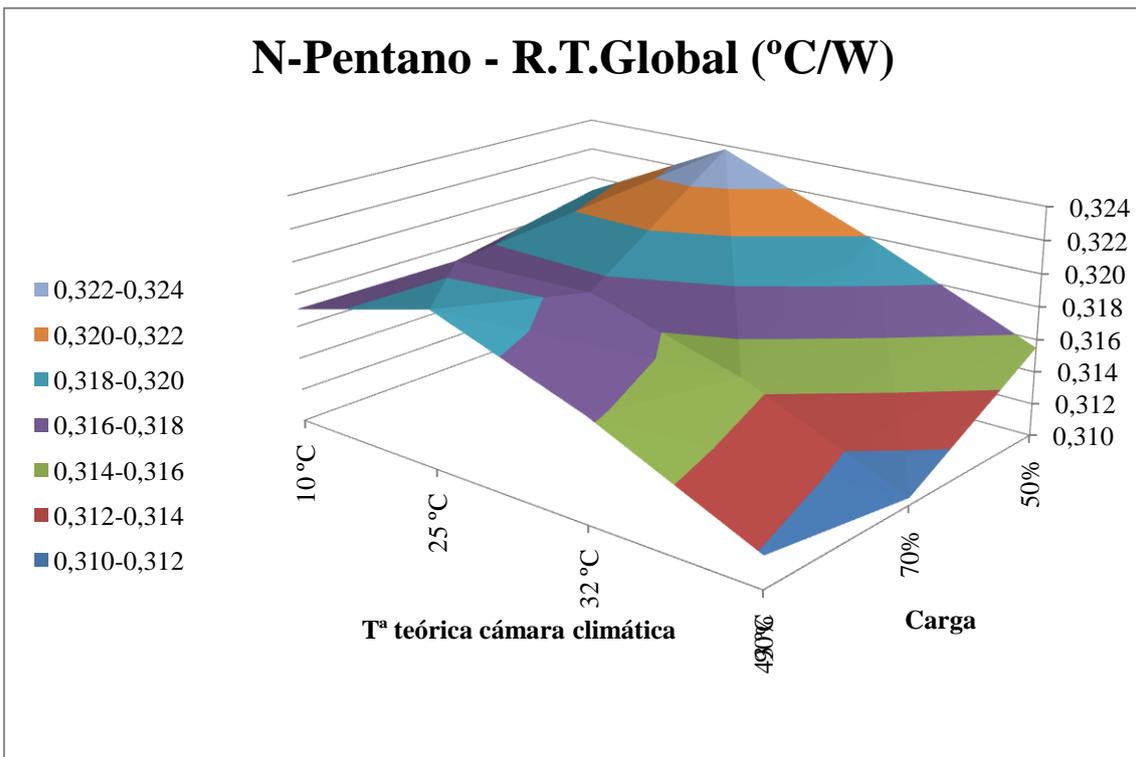
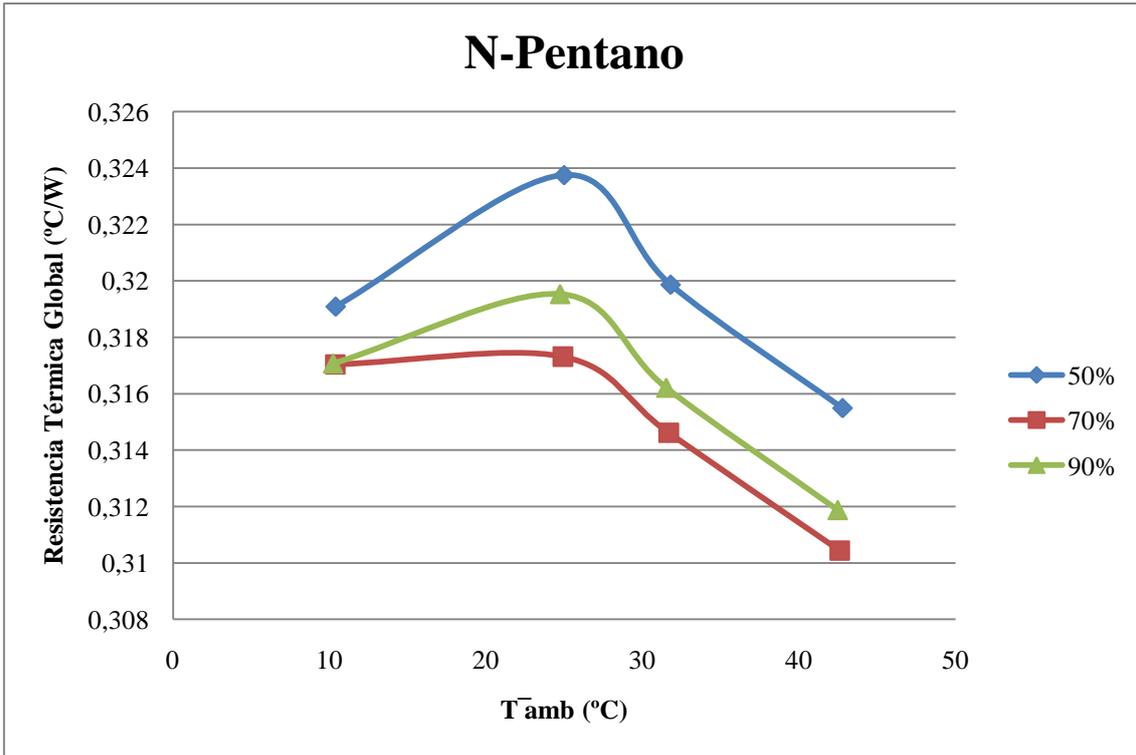
Tabla 6.3-36 Resultado numérico del ensayo con N-pentano al 50%, 150 W y posición vertical.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,37	1529	57,96	49,05	48,62	150,13	0,317	0,059	0,255	0,423
24,90	2397	72,46	64,07	63,76	149,87	0,317	0,056	0,259	0,303
31,67	2871	78,77	70,63	70,37	149,71	0,315	0,054	0,258	0,259
42,60	3785	89,01	81,41	81,11	149,50	0,310	0,051	0,258	0,303

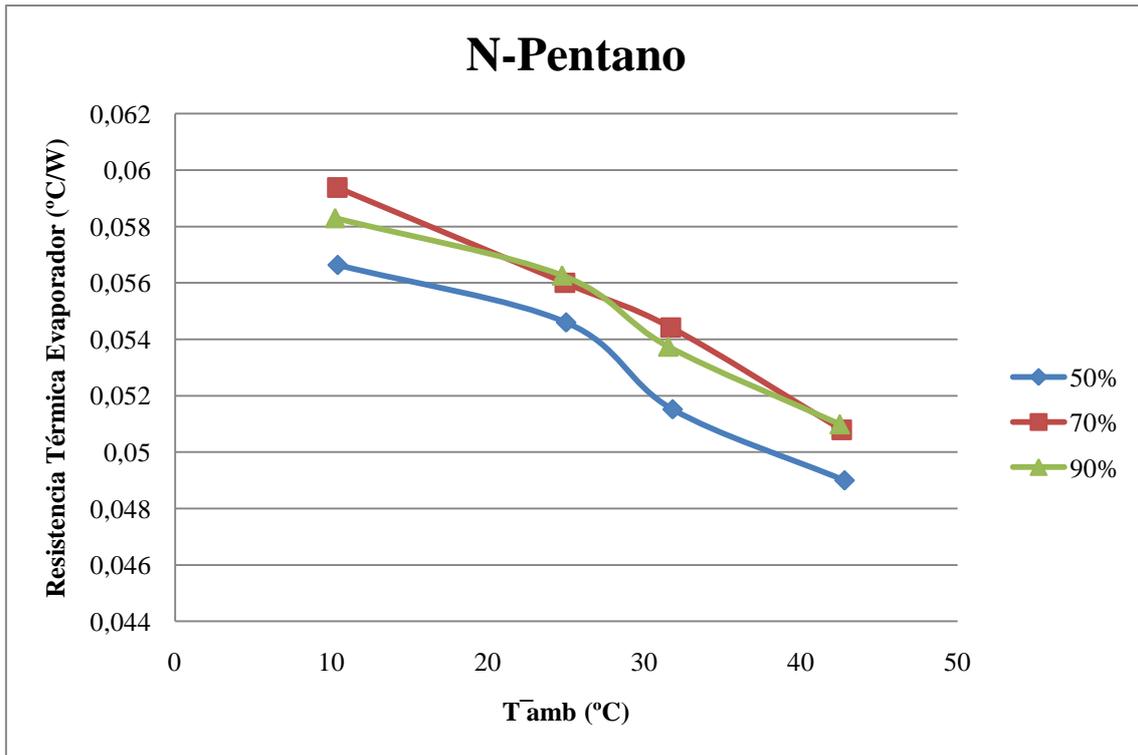
Tabla 6.3-37 Resultado numérico del ensayo con N-pentano al 70%, 150 W y posición vertical.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,23	1535	57,82	49,07	48,77	150,12	0,317	0,058	0,257	0,305
24,73	2401	72,58	64,15	63,85	149,75	0,320	0,056	0,261	0,307
31,51	2882	78,84	70,80	70,52	149,68	0,316	0,054	0,261	0,274
42,47	3795	89,08	81,46	81,17	149,46	0,312	0,051	0,259	0,293

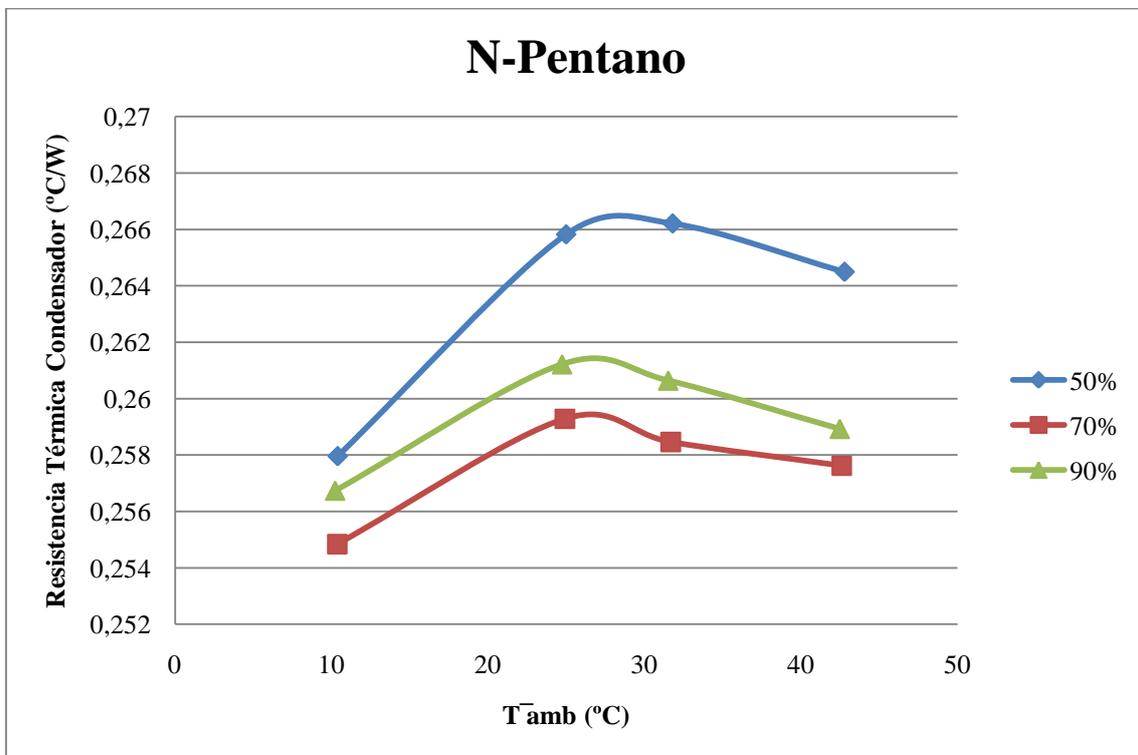
Tabla 6.3-38 Resultado numérico del ensayo con N-pentano al 90%, 150 W y posición vertical.



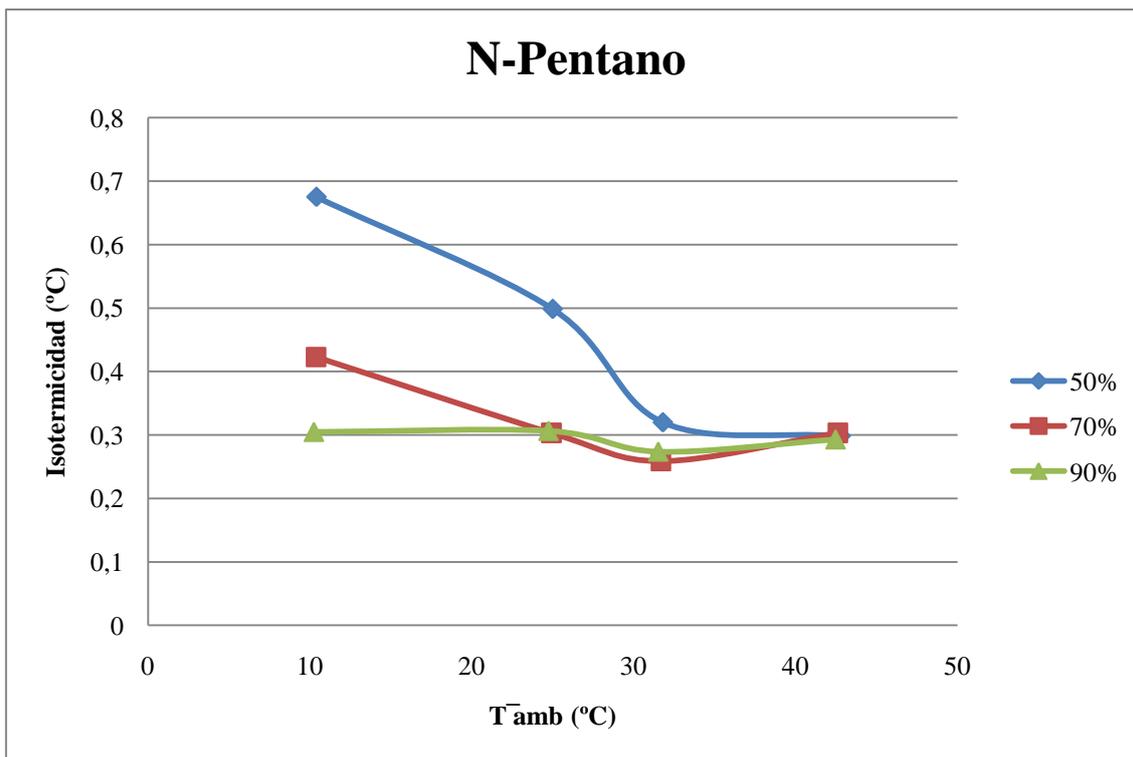
Gráfica 6.3-49 Variación de la resistencia térmica global con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-50 Variación de la resistencia térmica en el evaporador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-51 Variación de la resistencia térmica en el condensador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-52 Variación de la isotermicidad con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.

6.3.14 Fluido de trabajo R-141b

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
11,51	1934	63,86	53,22	52,20	149,73	0,350	0,071	0,272	1,025
25,79	2798	75,70	65,67	64,92	149,44	0,334	0,067	0,262	0,751
32,43	3348	81,61	72,13	71,48	149,47	0,329	0,063	0,261	0,649
43,13	4382	91,40	82,63	82,01	149,27	0,323	0,059	0,261	0,621

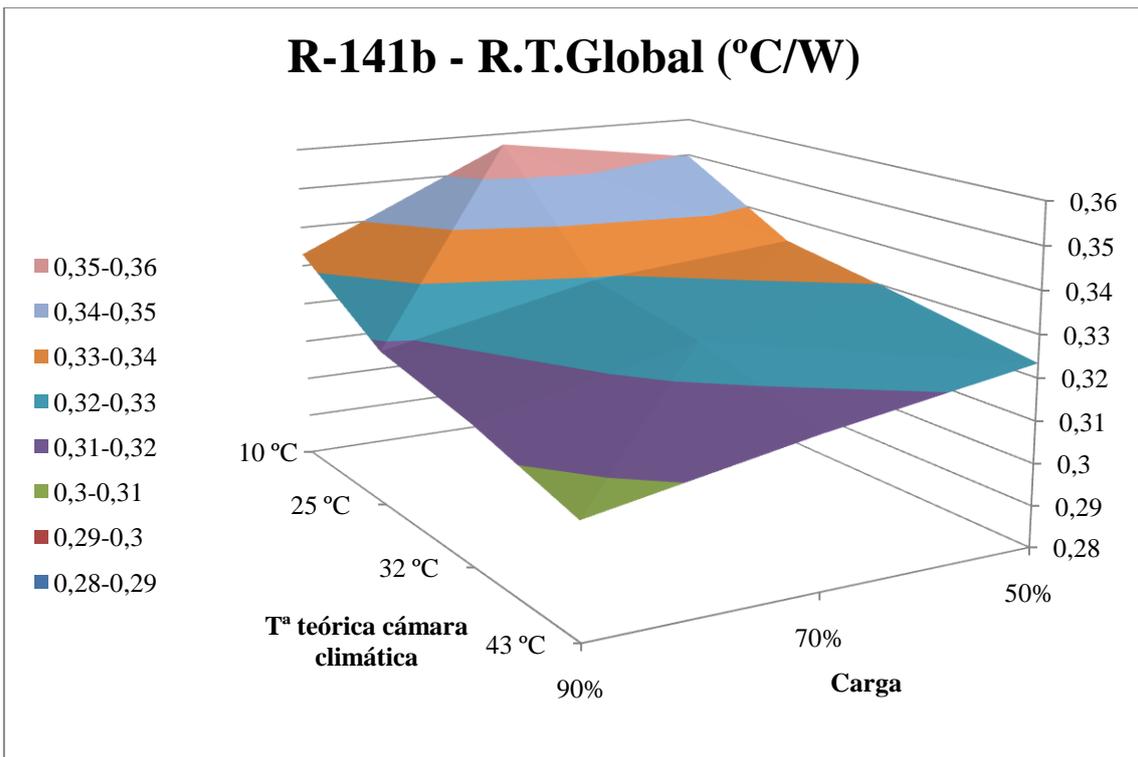
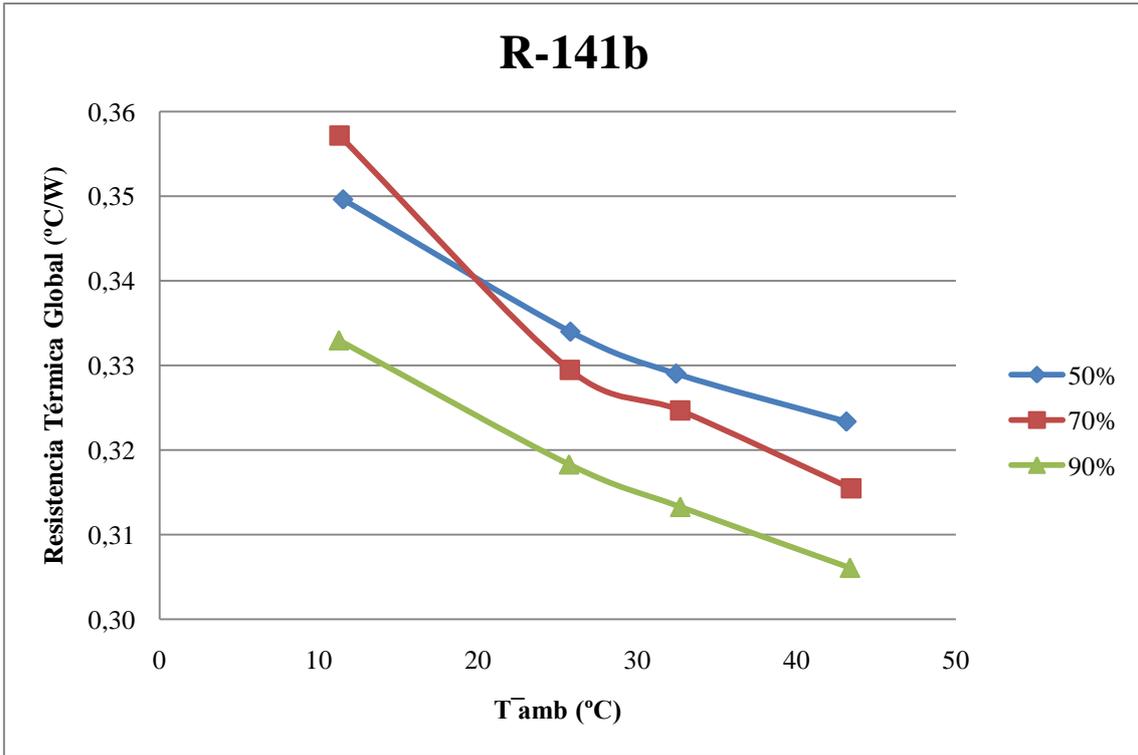
Tabla 6.3-39 Resultado numérico del ensayo con R-141b al 50%, 150 W y posición vertical.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
11,29	1899	64,94	52,56	51,63	150,20	0,357	0,082	0,269	0,928
25,76	2735	75,12	64,84	64,14	149,81	0,329	0,069	0,256	0,697
32,69	3301	81,28	71,62	71,06	149,67	0,325	0,065	0,256	0,566
43,42	4317	90,59	82,02	81,47	149,51	0,315	0,057	0,255	0,549

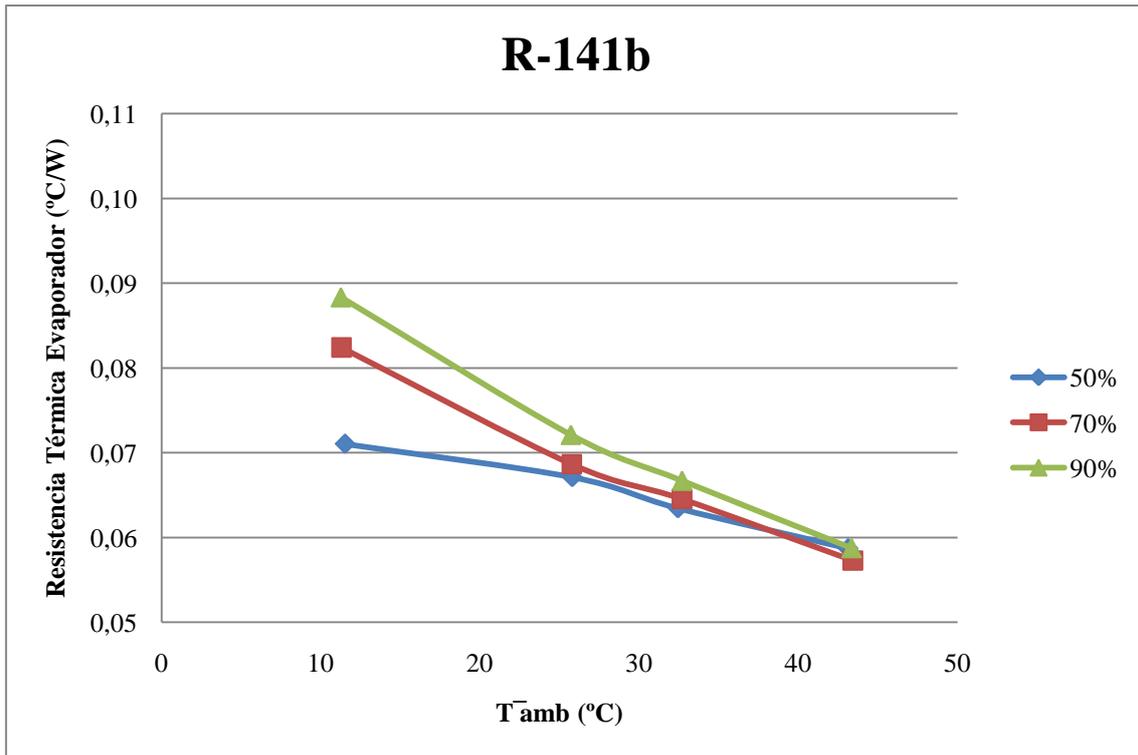
Tabla 6.3-40 Resultado numérico del ensayo con R-141b al 70%, 150 W y posición vertical.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
11,26	1640	61,10	47,88	46,91	149,70	0,333	0,088	0,238	0,970
25,71	2545	73,20	62,44	61,69	149,21	0,318	0,072	0,241	0,756
32,69	3104	79,39	69,45	68,88	149,08	0,313	0,067	0,243	0,574
43,34	4108	88,96	80,20	79,59	149,02	0,306	0,059	0,243	0,610

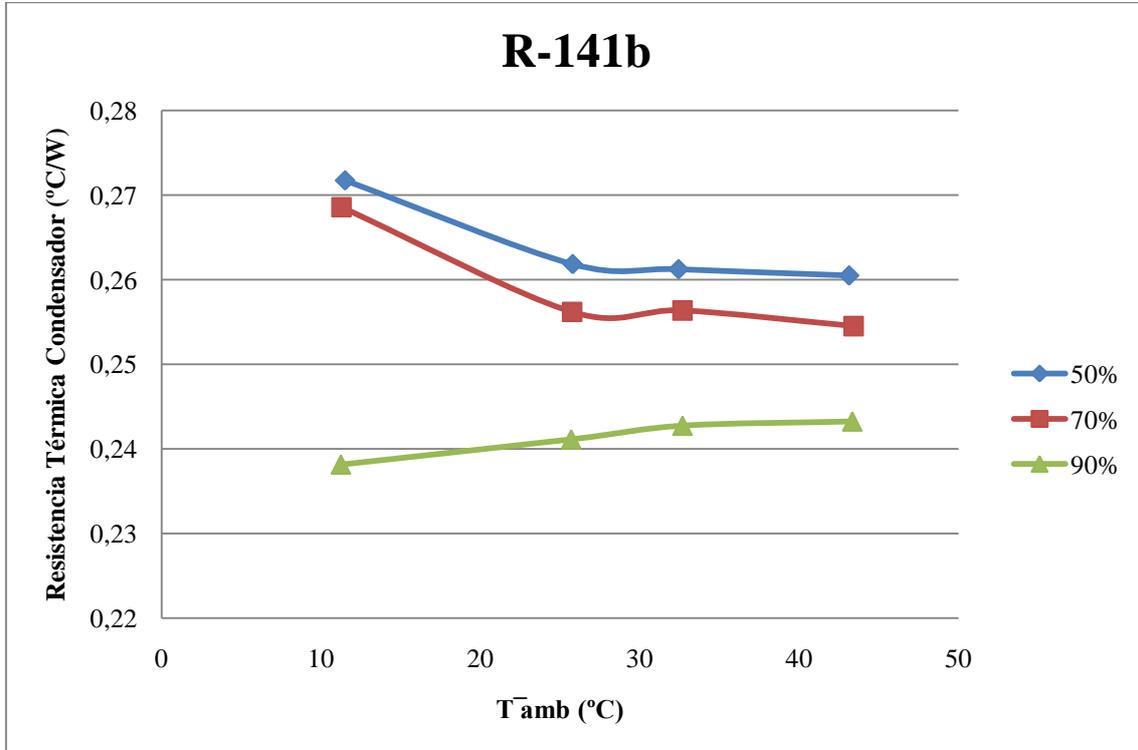
Tabla 6.3-41 Resultado numérico del ensayo con R-141b al 90%, 150 W y posición vertical.



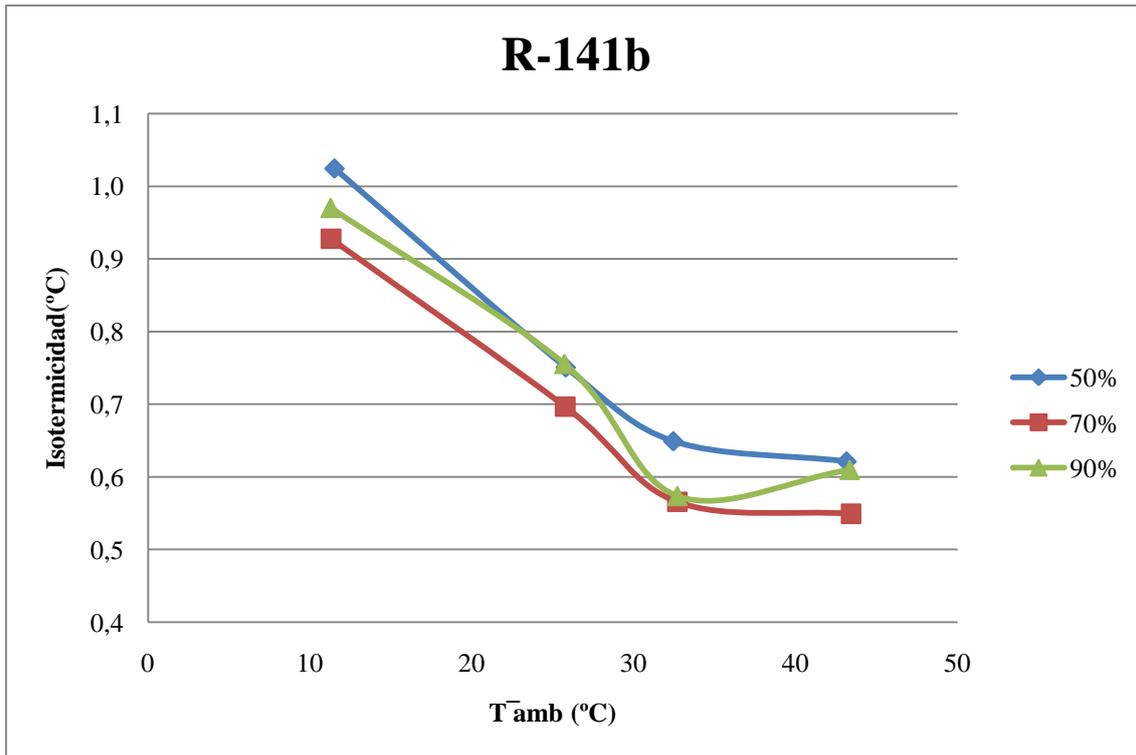
Gráfica 6.3-53 Variación de la resistencia térmica global con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-54 Variación de la resistencia térmica en el evaporador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-55 Variación de la resistencia térmica en el condensador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-56 Variación de la isotermicidad con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.

6.3.15 Fluido de trabajo R-365-mfc⁴

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,35	1367	58,02	48,56	47,89	149,87	0,318	0,063	0,251	0,663
25,02	2116	70,14	61,60	60,84	150,20	0,300	0,057	0,238	0,762
31,89	2590	76,54	68,41	67,84	150,15	0,297	0,054	0,239	0,570
42,96	3516	86,97	79,23	78,75	150,14	0,293	0,052	0,238	0,488

Tabla 6.3-42 Resultado numérico del ensayo con R-365-mfc al 50%, 150 W y posición vertical.

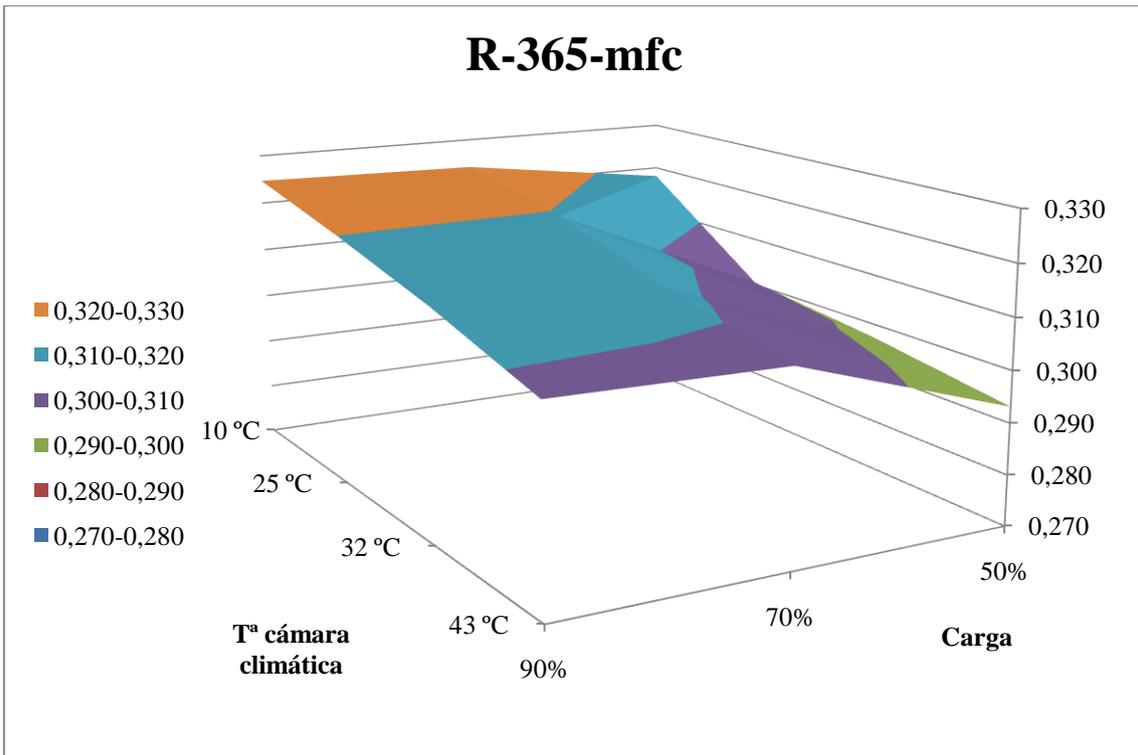
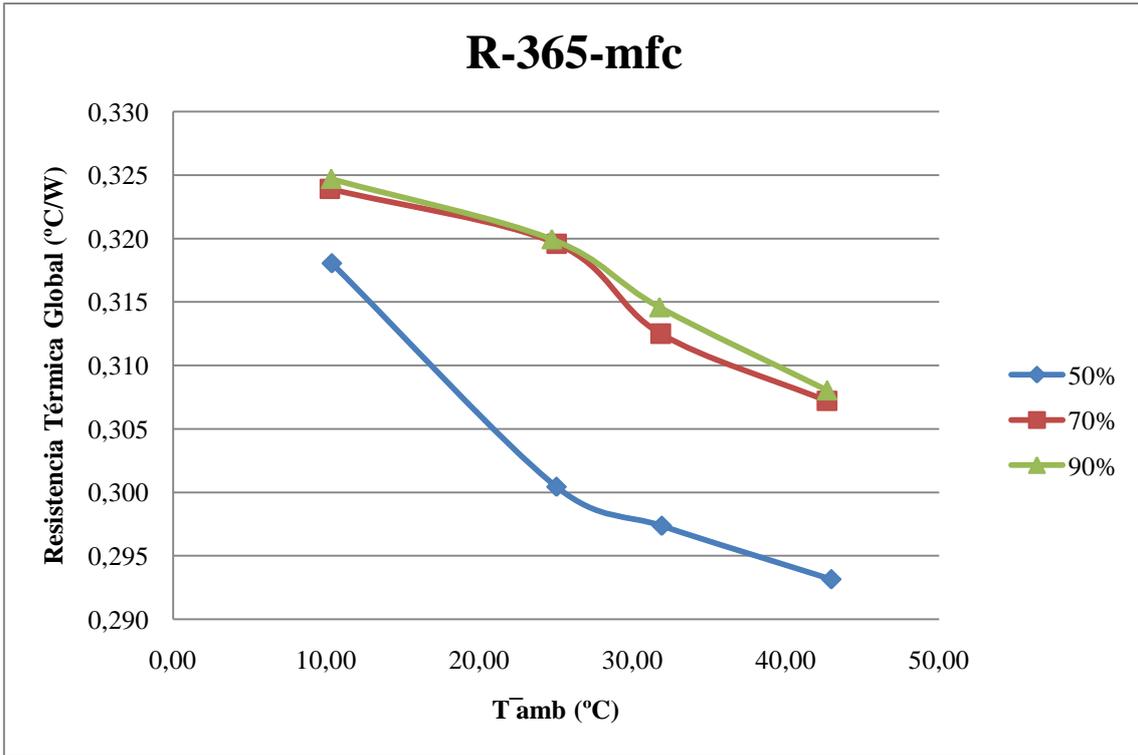
\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,23	1384	58,83	48,76		150,03	0,324	0,067		
25,04	2261	73,03	64,08	63,73	150,16	0,320	0,060	0,258	0,347
31,83	2761	78,69	70,61	70,48	149,96	0,313	0,054	0,258	0,124
42,68	3717	88,65	81,34		149,64	0,307	0,049		

Tabla 6.3-43 Resultado numérico del ensayo con R-365-mfc al 70%, 150 W y posición vertical.

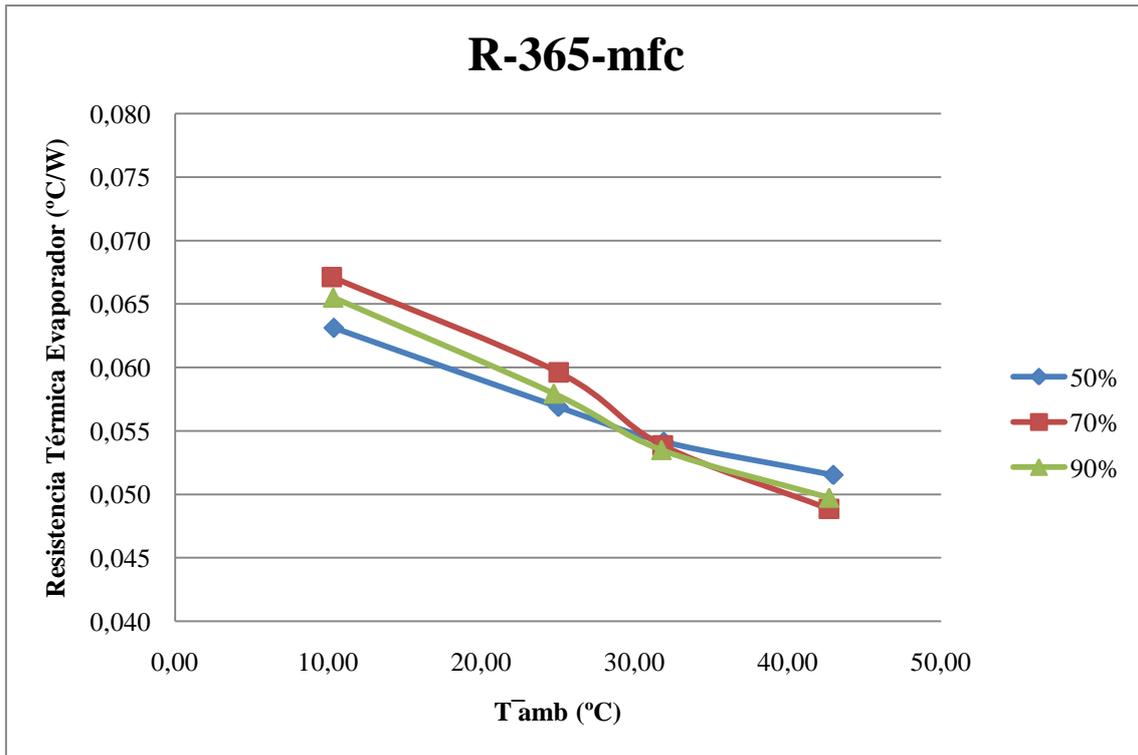
\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,32	1414	59,16	49,31	48,89	150,41	0,325	0,066	0,256	0,423
24,72	2273	72,77	64,07	63,68	150,17	0,320	0,058	0,259	0,387
31,75	2781	78,91	70,89	70,47	149,91	0,315	0,054	0,258	0,422
42,70	3722	88,78	81,34	80,87	149,60	0,308	0,050	0,255	0,463

Tabla 6.3-44 Resultado numérico del ensayo con R-365-mfc al 90%, 150 W y posición vertical.

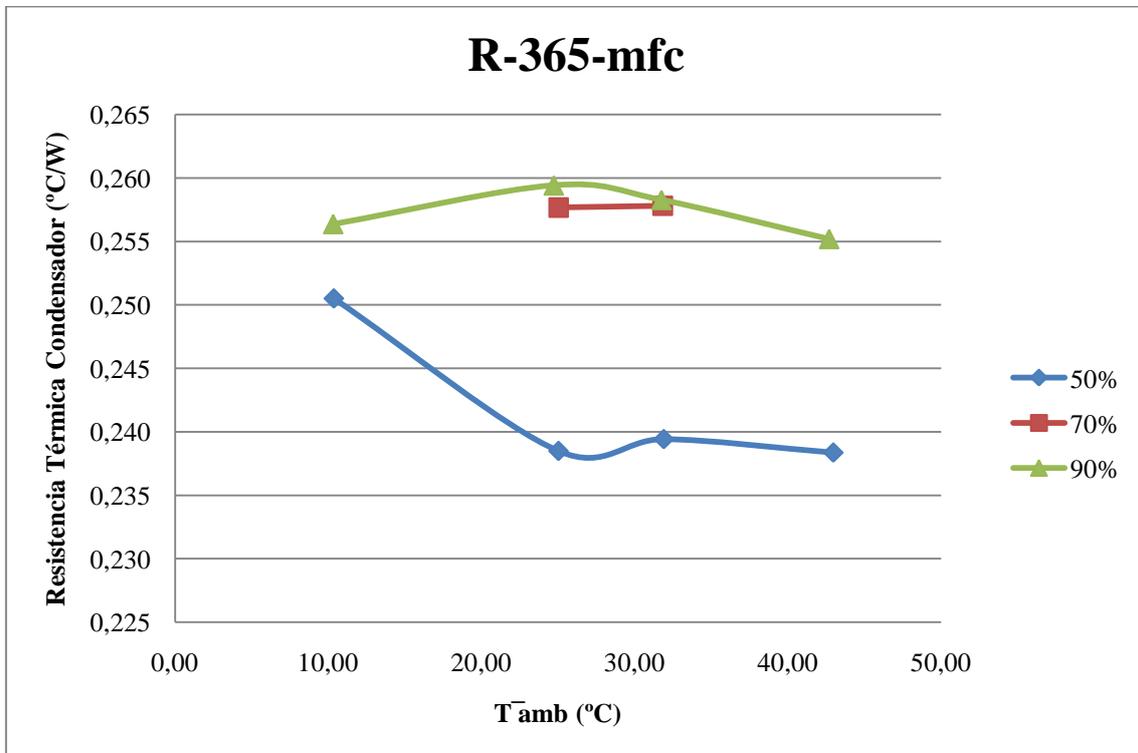
⁴ En el ensayo con el fluido de trabajo R-365 al 70% falló la sonda de temperatura del depósito superior.



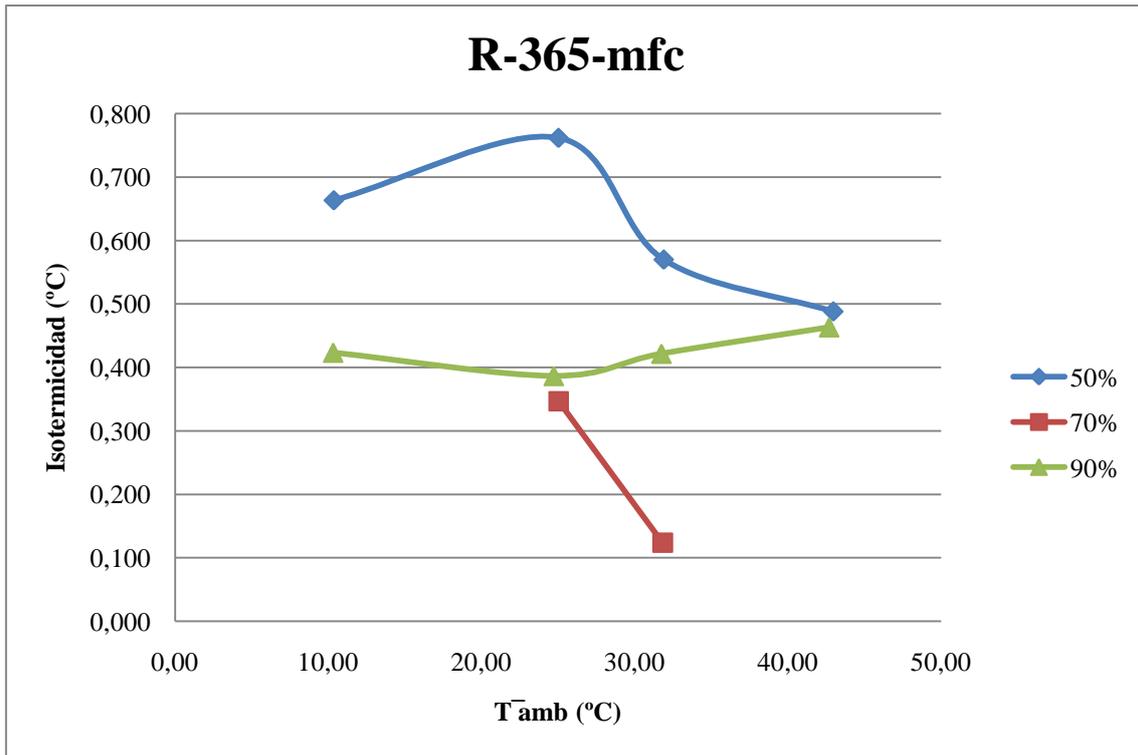
Gráfica 6.3-57 Variación de la resistencia térmica global con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-58 Variación de la resistencia térmica en el evaporador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-59 Variación de la resistencia térmica en el condensador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 6.3-60 Variación de la isotermicidad con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.

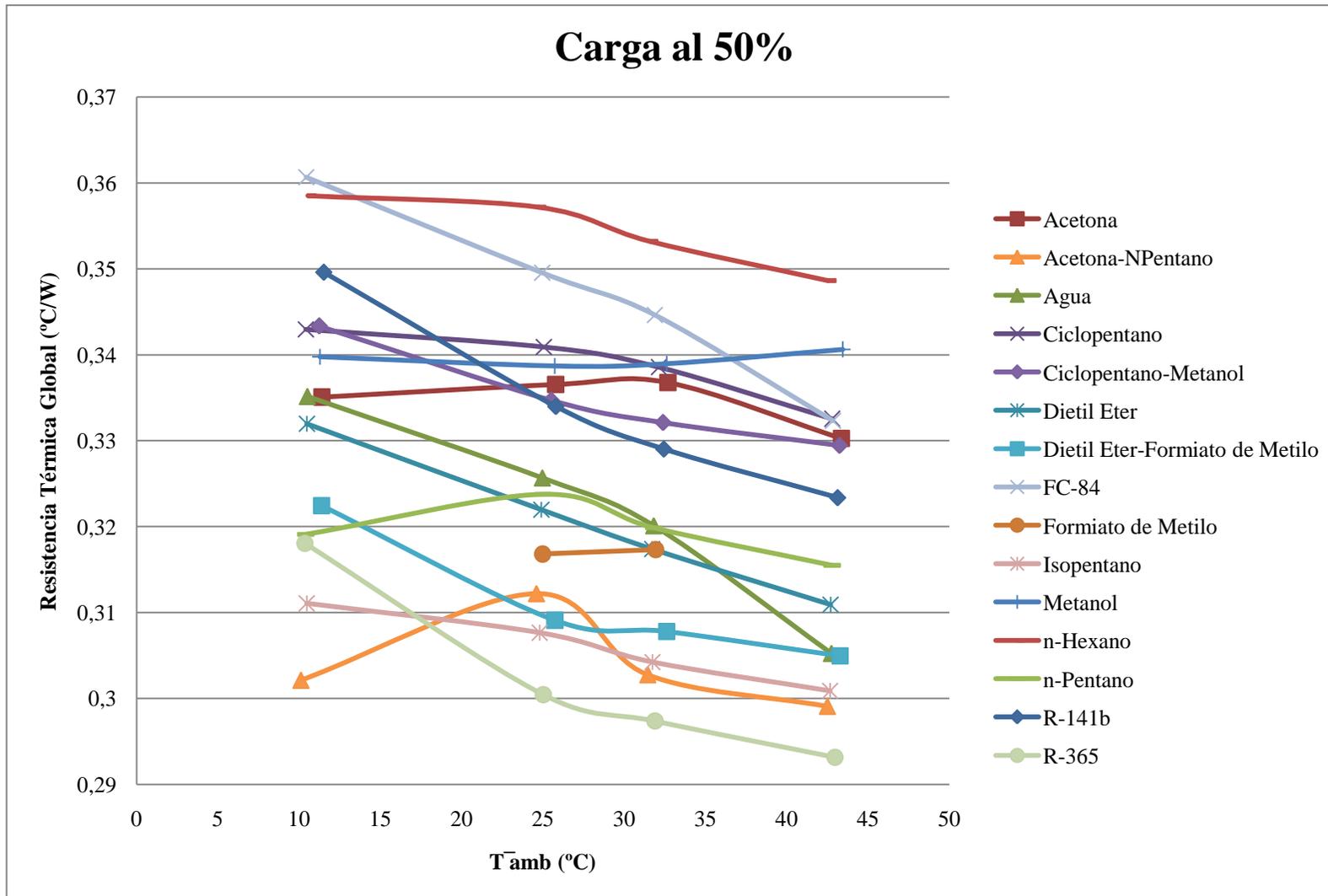
6.4 COMPORTAMIENTO DEL TERMOSIFÓN SEGÚN LA TEMPERATURA DE LA CÁMARA CLIMÁTICA Y EL FLUIDO DE TRABAJO

Se va a continuar con el análisis del comportamiento del termosifón estudiando los cambios en su rendimiento al variar la temperatura de la cámara climática y el fluido utilizado. Con este fin, se van a comparar los resultados de los ensayos realizados con todos los fluidos de trabajo para una carga determinada (50%, 70% o 90%), flujo de calor de 150 W y el termosifón en posición vertical.

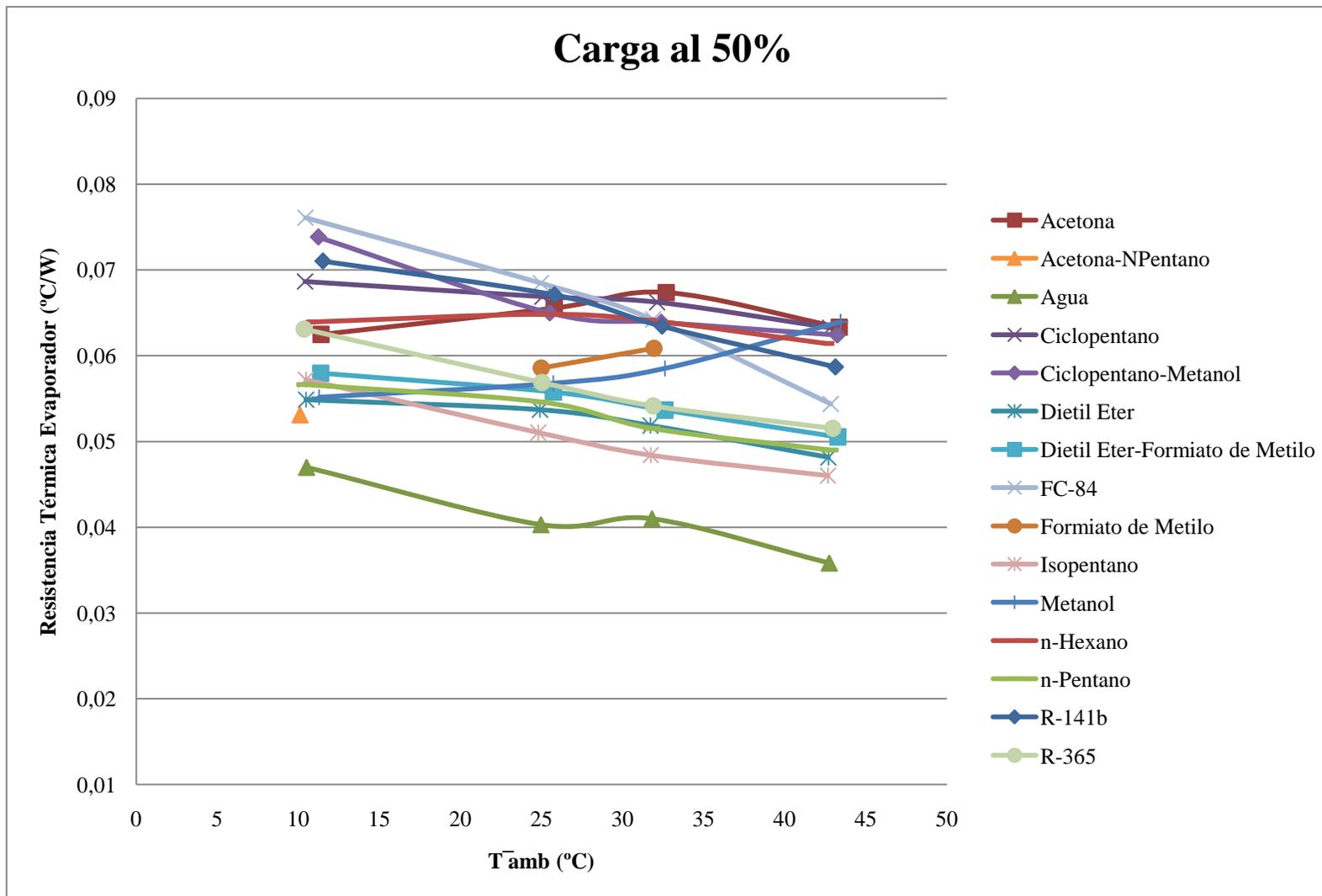
La comparación entre ensayos se va a realizar representando en gráficas el valor de las resistencias térmicas e isothermicidad, definidas en la sección 6.2, frente a la temperatura ambiente media (\bar{T}_{amb}) de la cámara climática.

El análisis se va a dividir en tres bloques, uno por cada carga de fluido de trabajo. Los resultados numéricos de los ensayos están expuestos en las tablas de la sección anterior, 6.3.

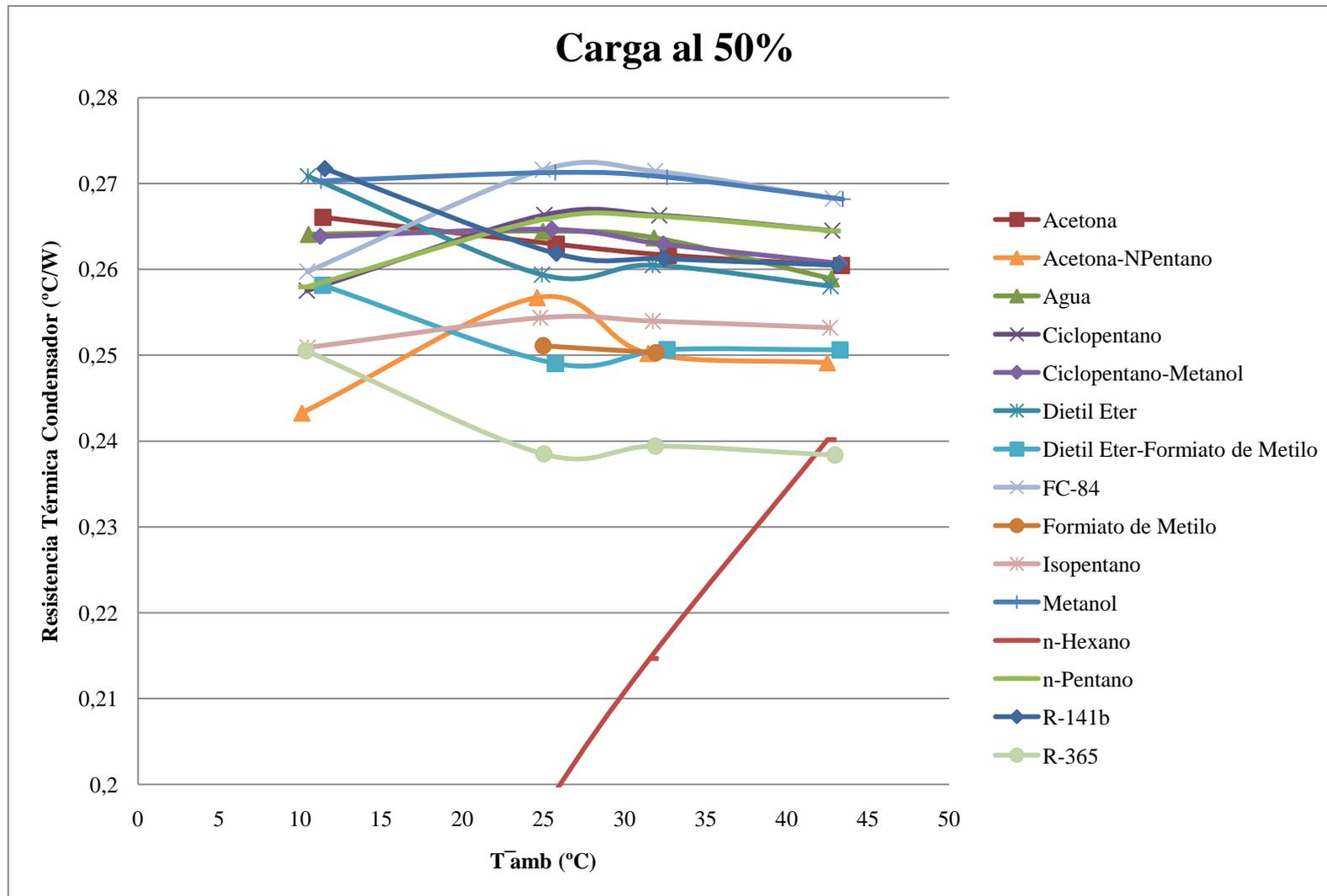
6.4.1 Bloque de ensayos al 50%



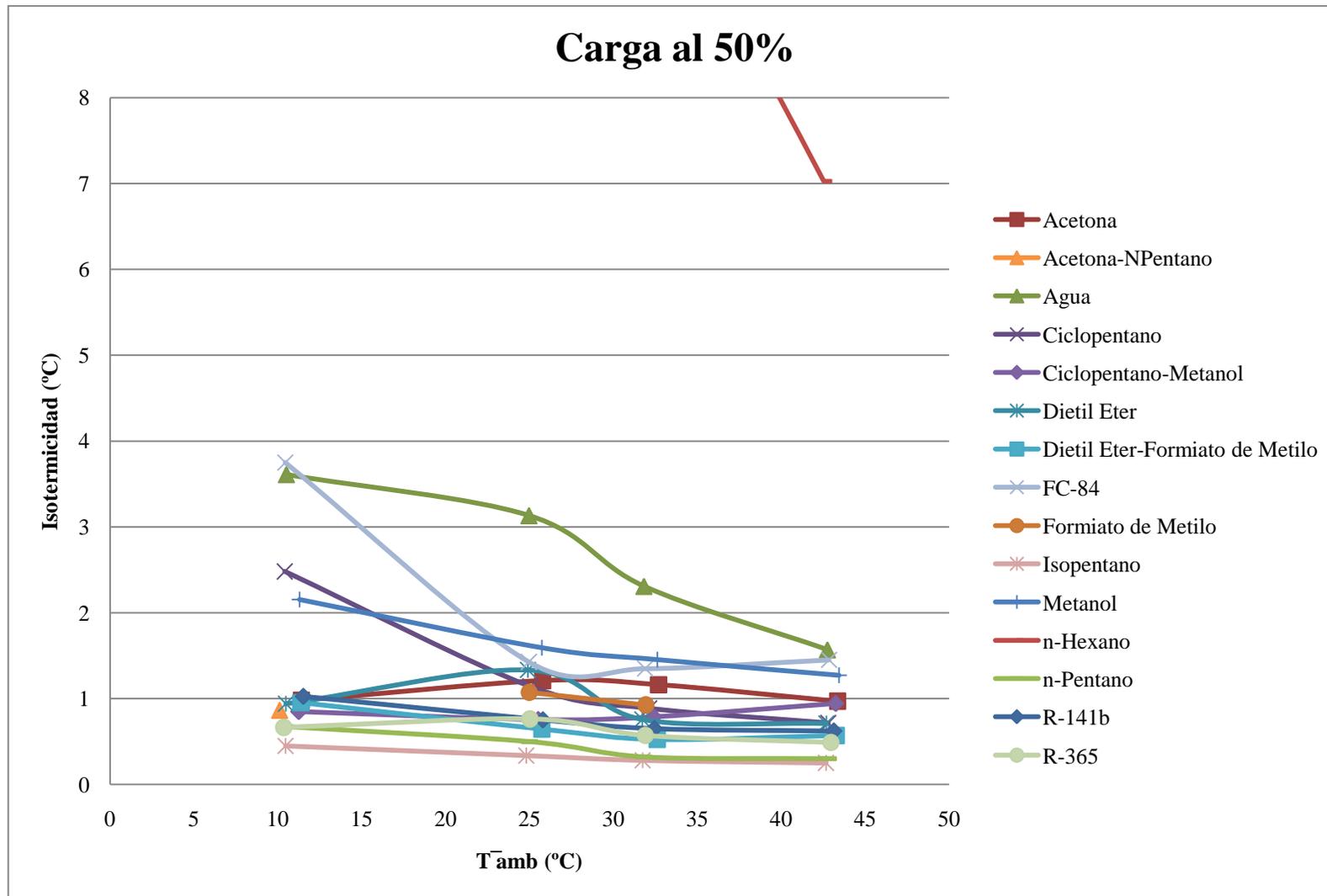
Gráfica 6.4-1 Variación de la resistencia térmica global con respecto a la temperatura de la cámara climática y al fluido de trabajo con carga del 50%.



Gráfica 6.4-2 Variación de la resistencia térmica en el evaporador con respecto a la temperatura de la cámara climática y al fluido de trabajo con carga del 50%.

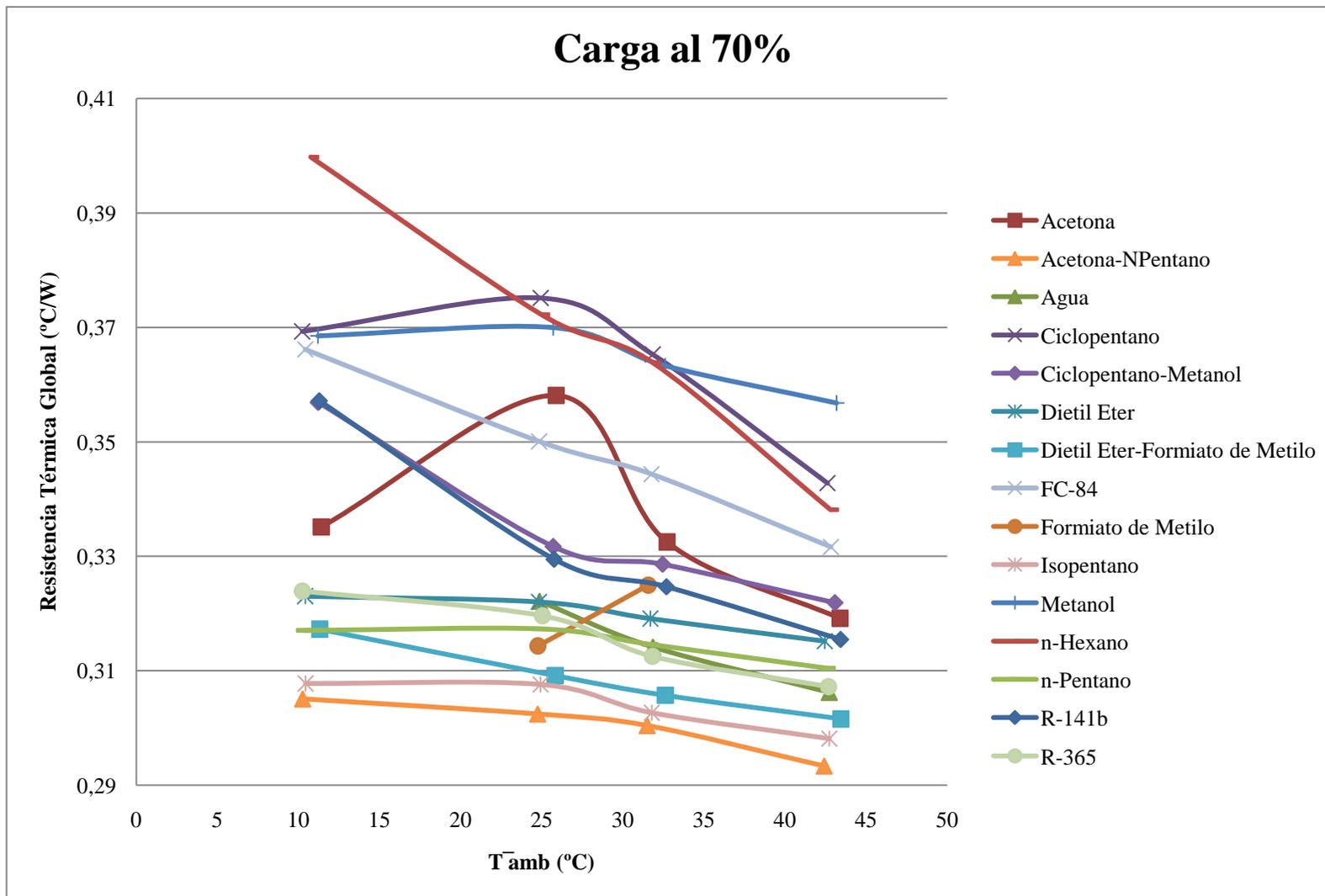


Gráfica 6.4-3 Variación de la resistencia térmica en el condensador con respecto a la temperatura de la cámara climática y al fluido de trabajo con carga del 50%.

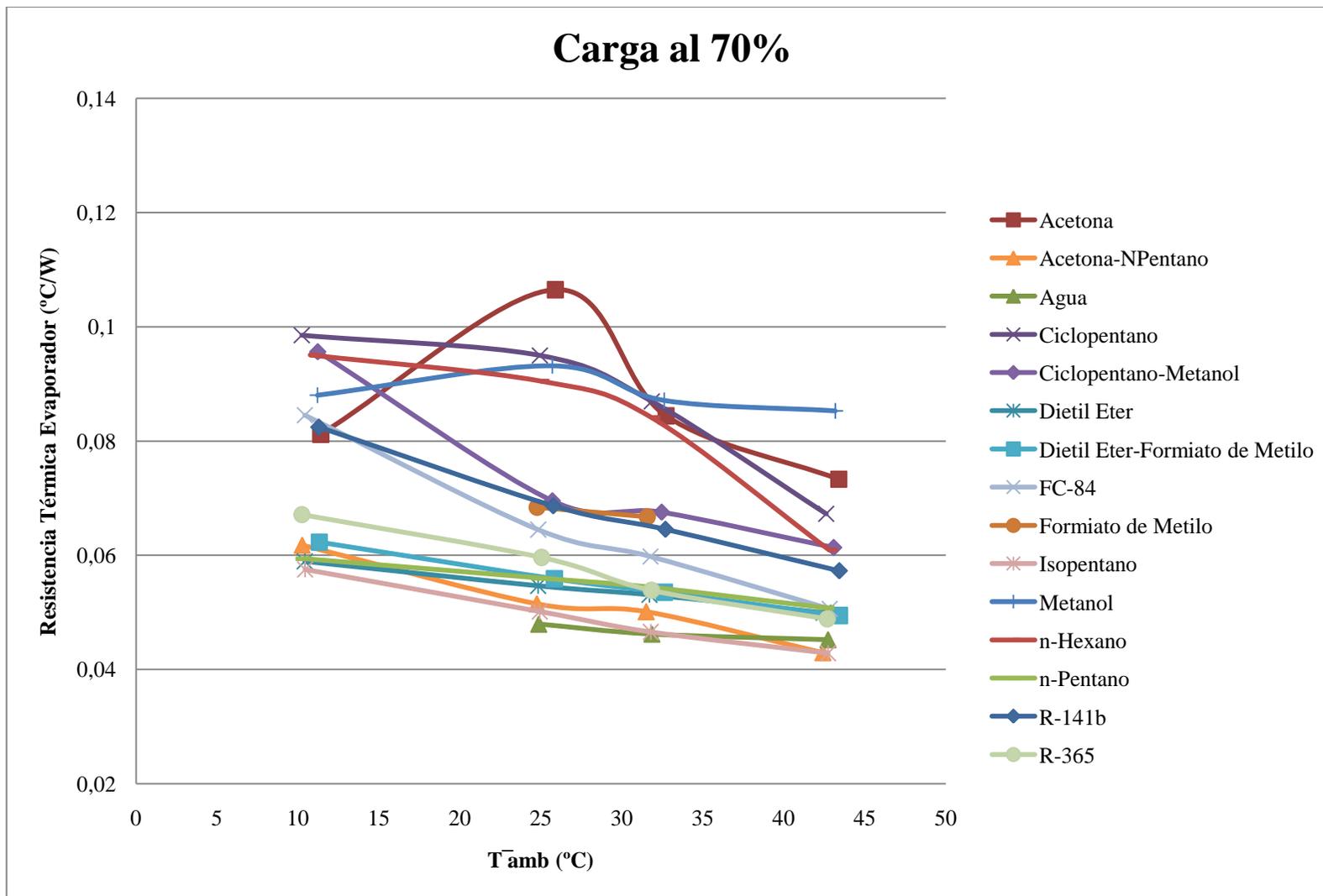


Gráfica 6.4-4 Variación de la isotermicidad con respecto a la temperatura de la cámara climática y al fluido de trabajo con carga del 50%. El N-hexano se ha quedado fuera de escala.

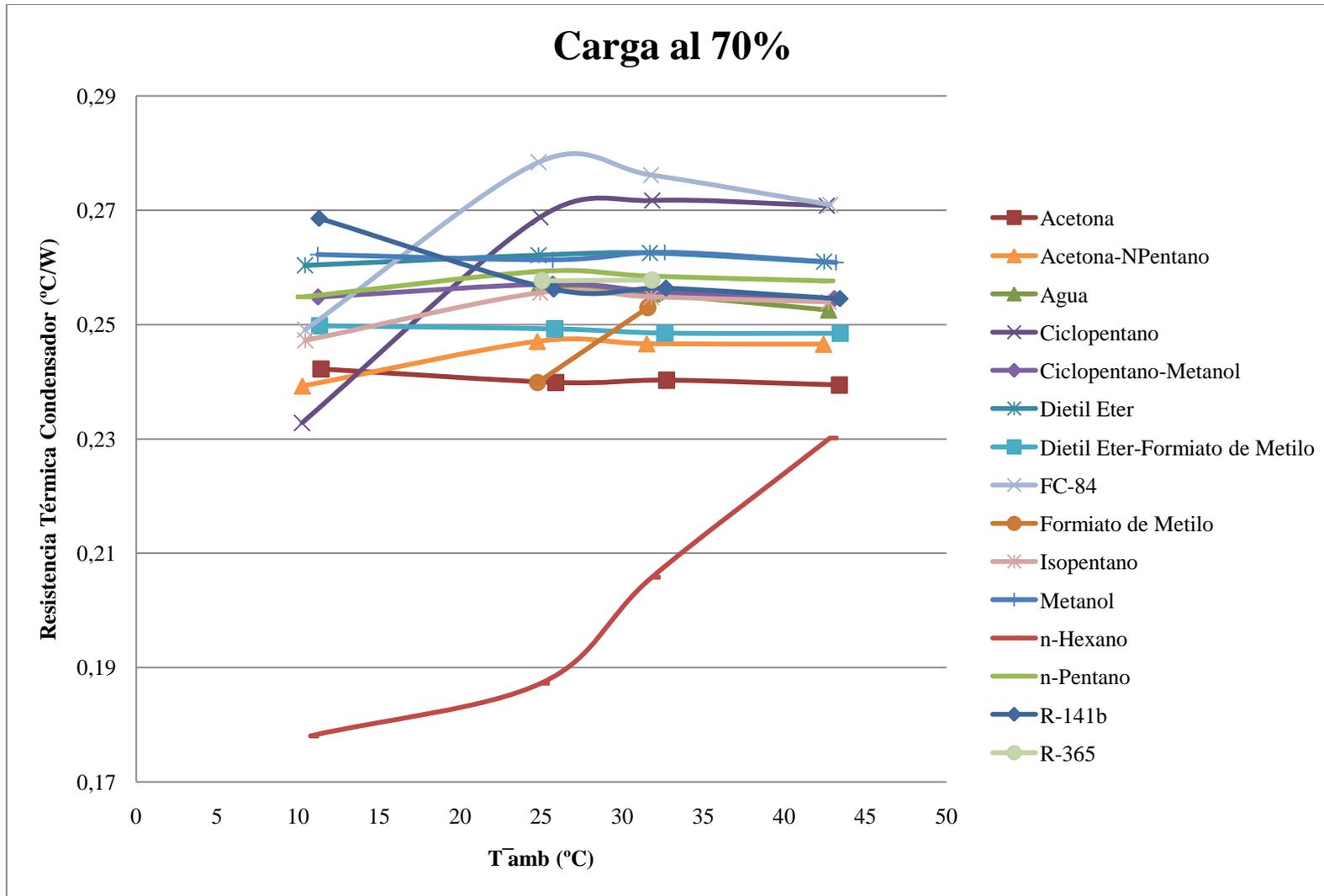
6.4.2 Bloque de ensayos al 70%



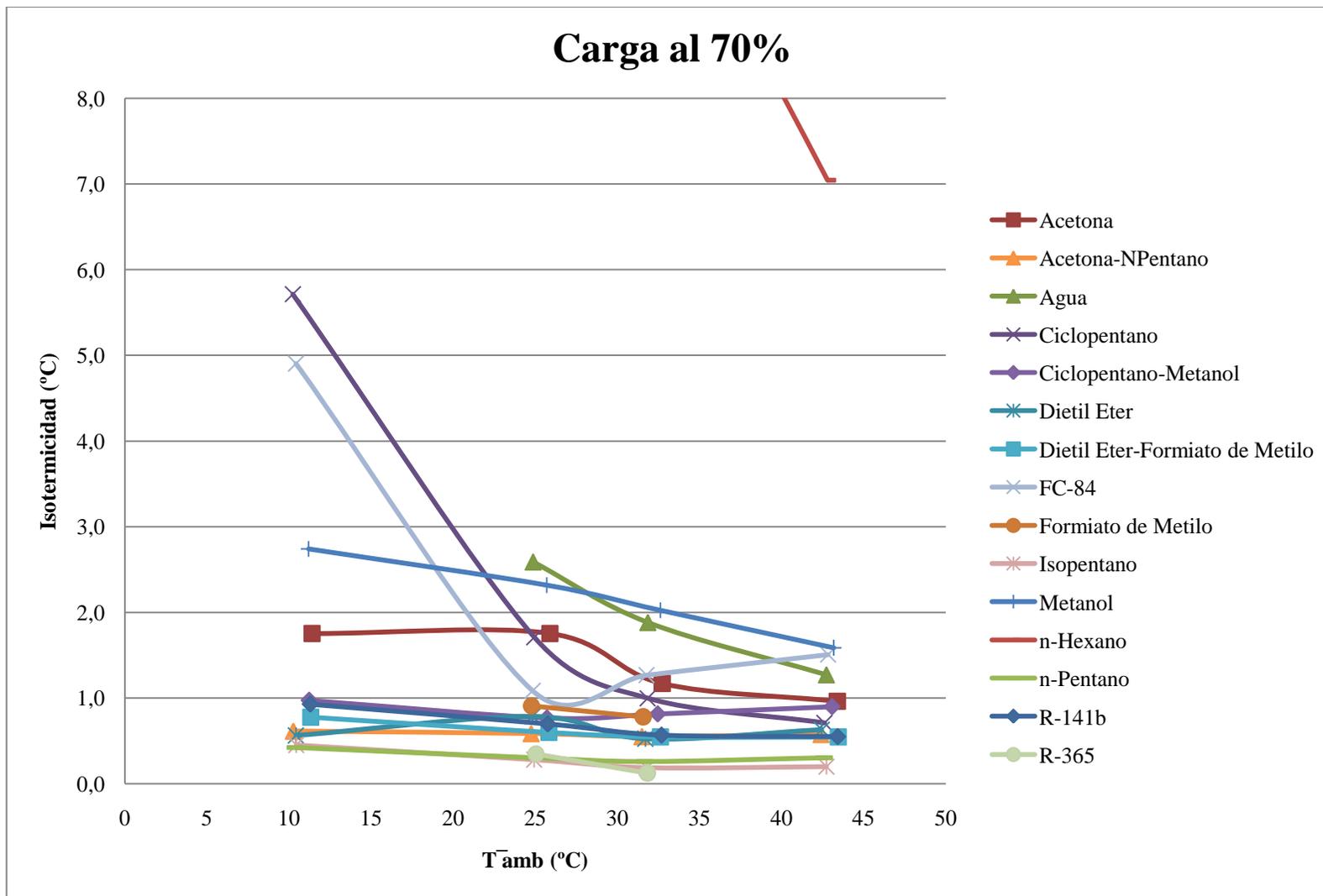
Gráfica 6.4-5 Variación de la resistencia térmica global con respecto a la temperatura de la cámara climática y al fluido de trabajo con carga del 70%.



Gráfica 6.4-6 Variación de la resistencia térmica en el evaporador con respecto a la temperatura de la cámara climática y al fluido de trabajo con carga del 70%.

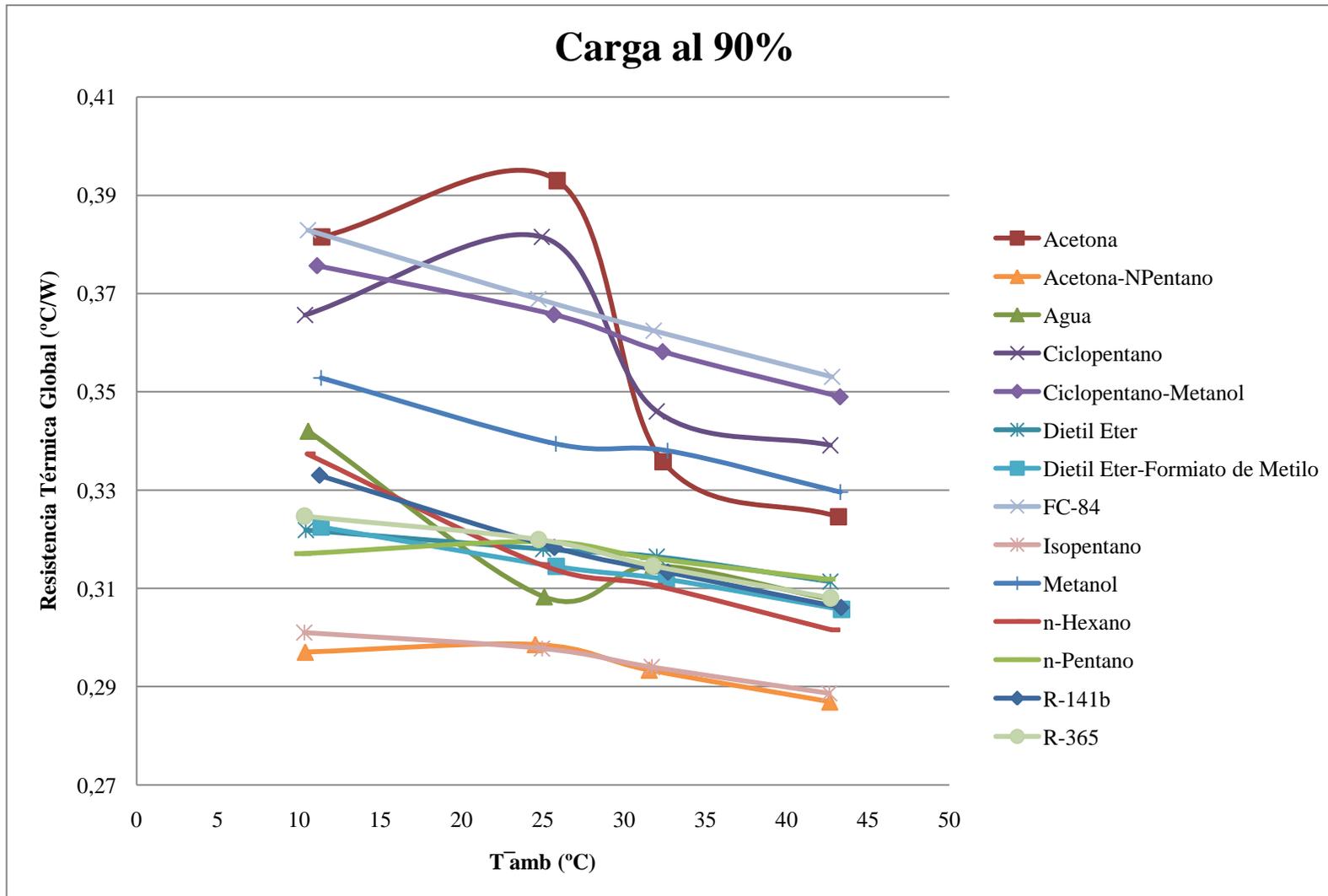


Gráfica 6.4-7 Variación de la resistencia térmica en el condensador con respecto a la temperatura de la cámara climática y al fluido de trabajo con carga del 70%.

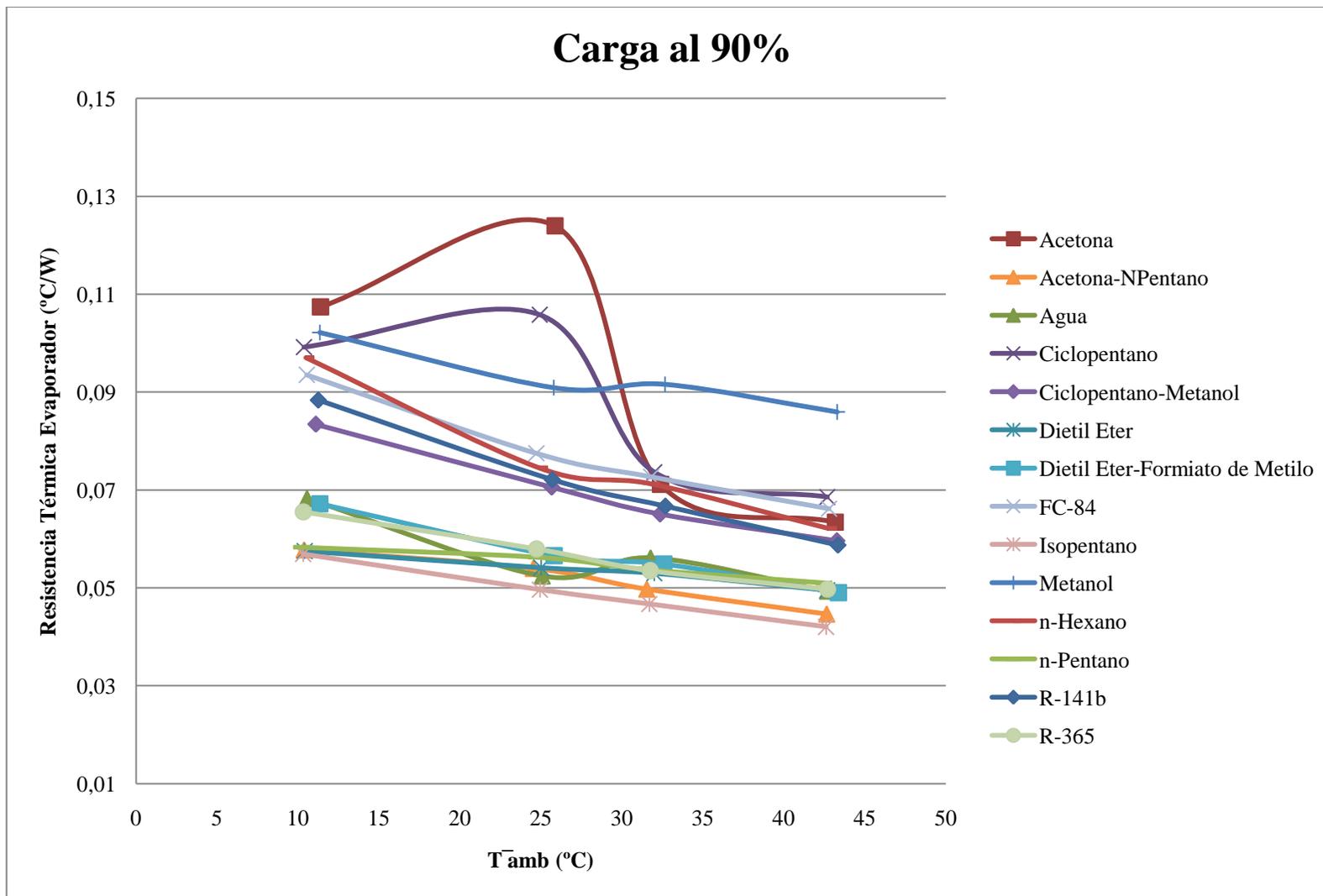


Gráfica 6.4-8 Variación de la isotermicidad con respecto a la temperatura de la cámara climática y al fluido de trabajo con carga del 70%.

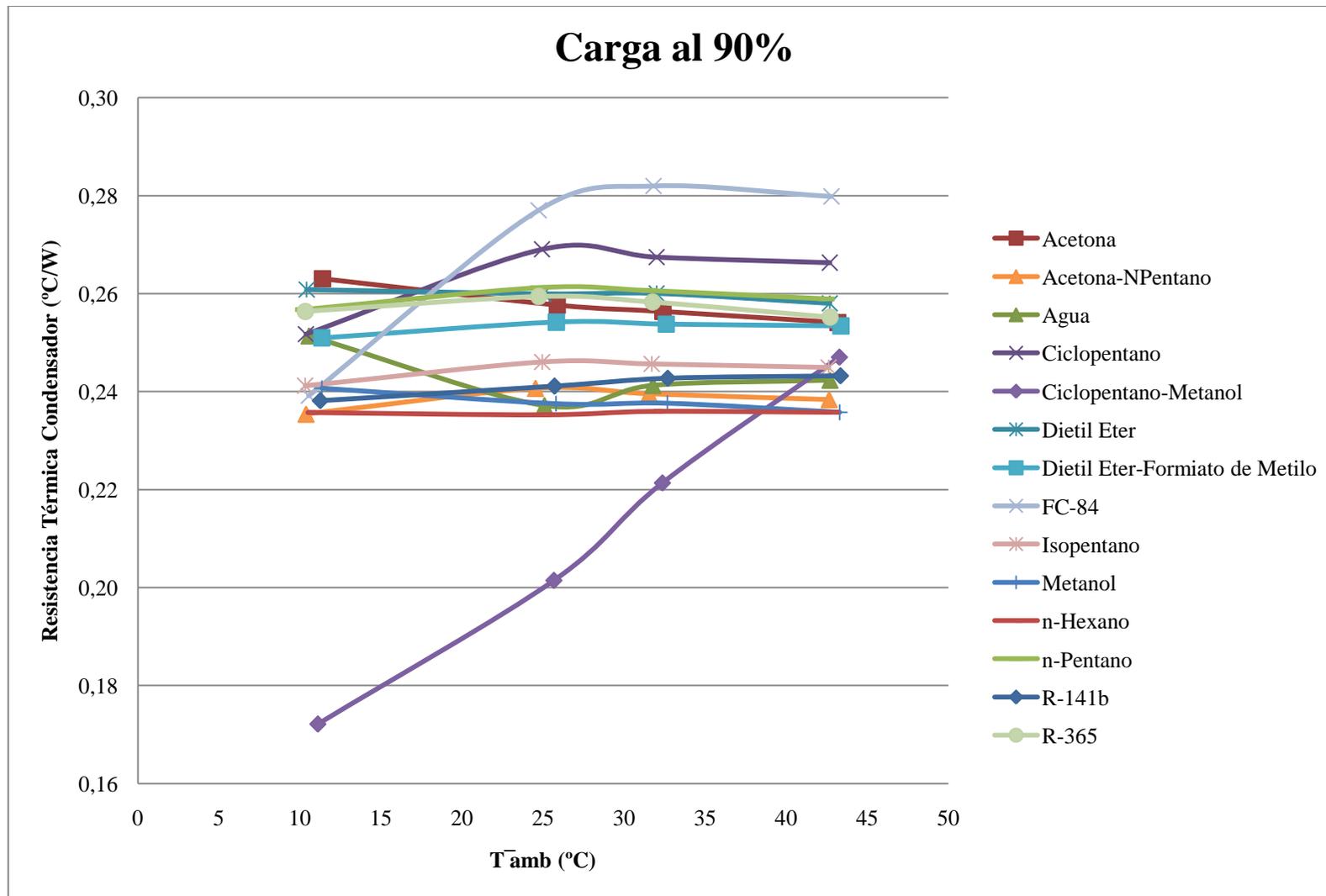
6.4.3 Bloque de ensayos al 90%



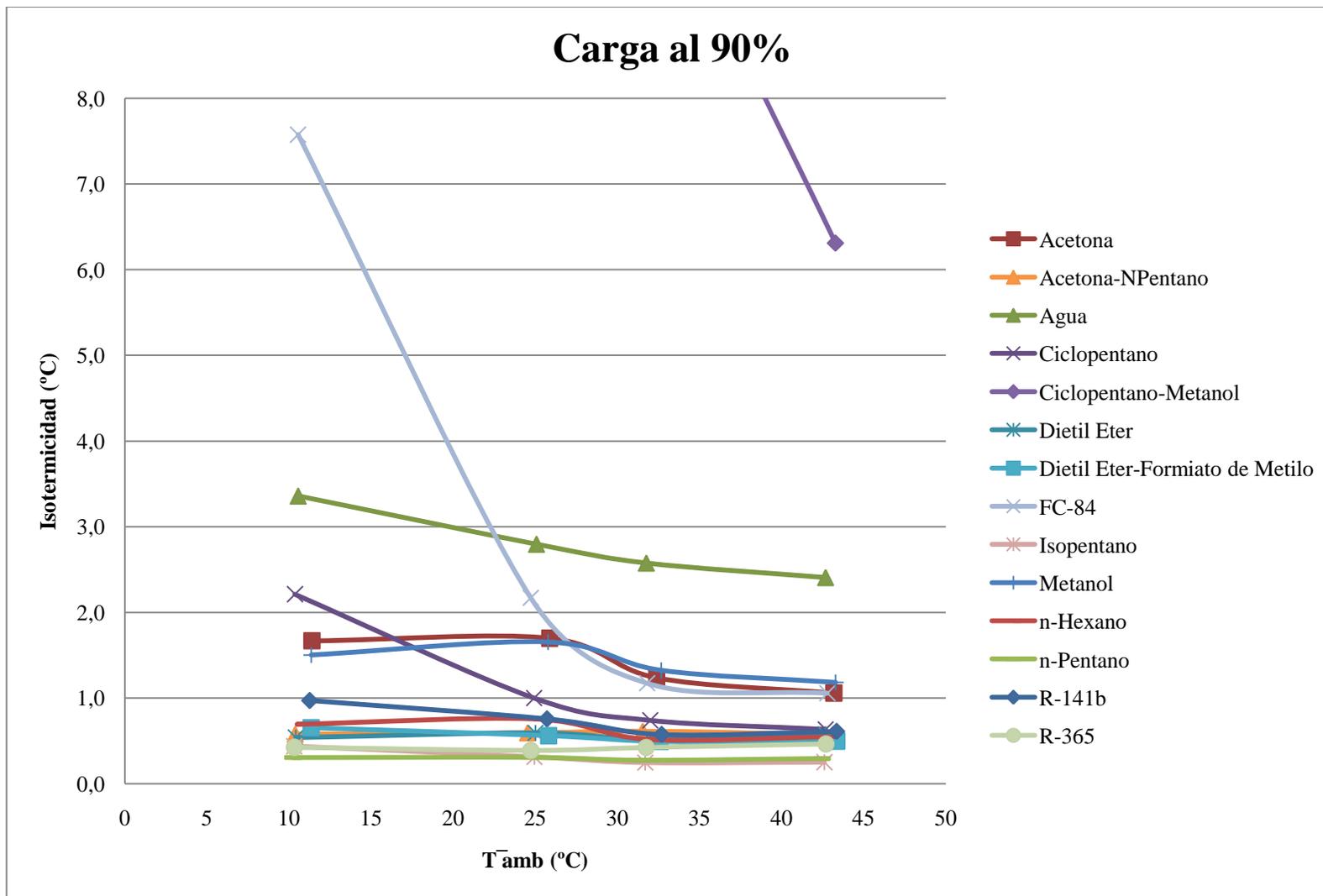
Gráfica 6.4-9 Variación de la resistencia térmica global con respecto a la temperatura de la cámara climática y al fluido de trabajo con carga del 90%.



Gráfica 6.4-10 Variación de la resistencia térmica en el evaporador con respecto a la temperatura de la cámara climática y al fluido de trabajo con carga del 90%.



Gráfica 6.4-11 Variación de la resistencia térmica en el condensador con respecto a la temperatura de la cámara climática y al fluido de trabajo con carga del 90%.



Gráfica 6.4-12 Variación de la isotermicidad con respecto a la temperatura de la cámara climática y al fluido de trabajo con carga del 90%.

6.5 DIFERENCIAS DE COMPORTAMIENTO SEGÚN OTRAS VARIABLES

Con dos fluidos de trabajo, el R-141b y el N-hexano, se ha hecho trabajar al prototipo de termosifón variando la entrada de flujo de calor por el evaporador y la inclinación del propio dispositivo. A continuación se presentan los resultados de estos ensayos.

6.5.1 Flujo de calor entrante

Se va a analizar el comportamiento del termosifón con la variación de la temperatura de la cámara climática y del flujo de calor para dos fluidos de trabajo. Se han realizado ensayos con flujos de calor de 75 W, 100 W, 125 W, 150 W, 175 W y 200 W. Las siguientes condiciones de trabajo se han mantenido constantes en todos los ensayos:

- Carga del fluido de trabajo al 90%.
- Termosifón en posición vertical.

6.5.1.1 Fluido de trabajo R-141b⁵

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,24	924	40,04	30,02	29,25	75,19	0,396	0,133	0,253	0,77
24,48	1483	53,90	44,12	43,36	75,06	0,392	0,130	0,252	0,76
31,19	1839	60,63	50,89	50,08	75,01	0,393	0,130	0,252	0,82
41,92	2521	71,14	61,42	60,74	74,92	0,390	0,130	0,251	0,68

Tabla 6.5-1 Resultado numérico del ensayo con R-141b y 75 W, carga del 90% y posición vertical.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,18	1082	47,58	34,84	33,78	100,02	0,374	0,127	0,236	1,06
24,57	1761	64,50	49,88	48,56	99,82	0,400	0,146	0,240	1,33
31,37	2170	65,30	56,39	55,51	99,75	0,340	0,089	0,242	0,88
41,90	2933	73,71	66,75	66,27	99,66	0,319	0,070	0,245	0,49

Tabla 6.5-2 Resultado numérico del ensayo con R-141b y 100 W, carga del 90% y posición vertical.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,27	1330	53,71	40,66	39,99	125,21	0,347	0,104	0,237	0,67
24,50	2125	65,52	55,50	54,89	125,04	0,328	0,080	0,243	0,61
31,40	2597	71,30	62,31	61,77	124,88	0,319	0,072	0,243	0,55
42,12	3479	79,68	73,00	72,65	124,81	0,301	0,054	0,245	0,34

Tabla 6.5-3 Resultado numérico del ensayo con R-141b y 125 W, carga del 90% y posición vertical.

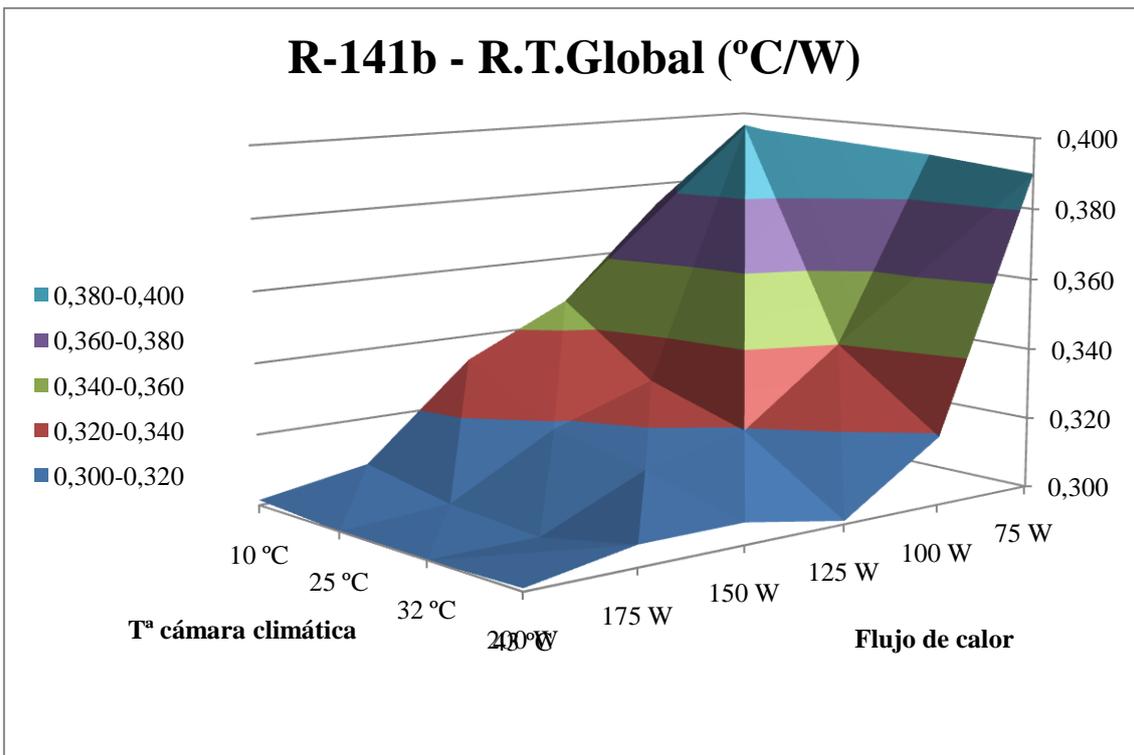
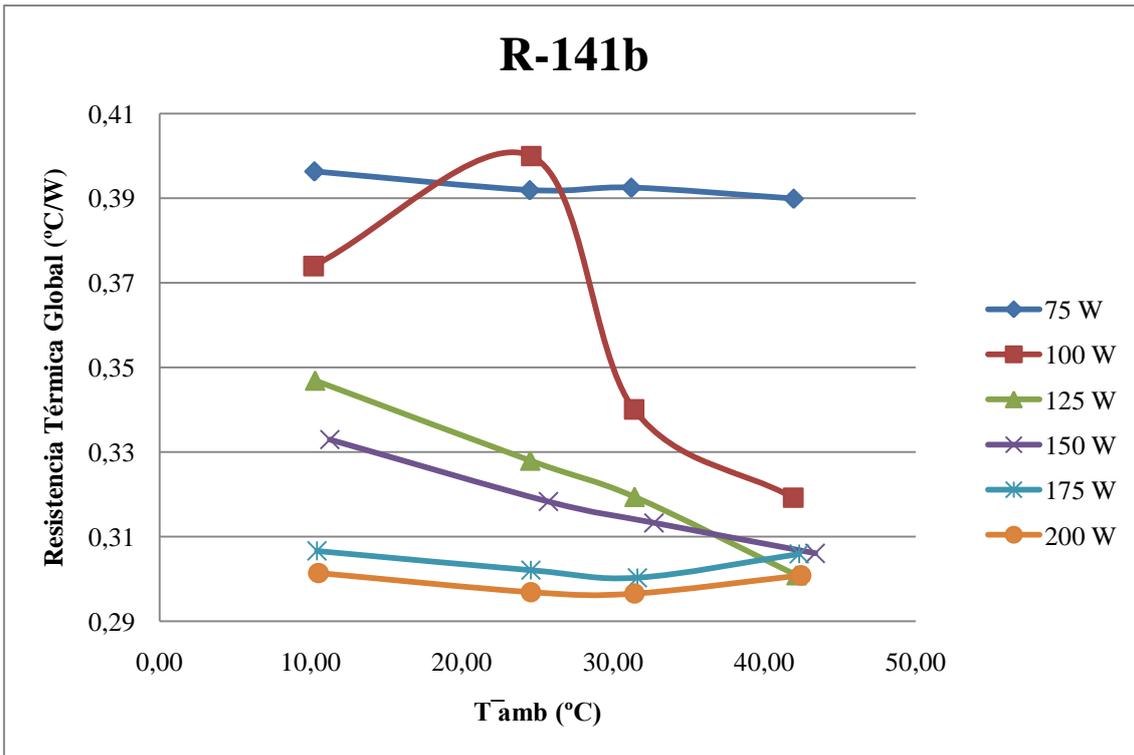
⁵ Los resultados numéricos del ensayo con R-141b a 150 W, carga del 90% y en posición vertical se aportan en la Tabla 6.3-41.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,40	1945	64,23	52,43	52,05	175,50	0,307	0,067	0,237	0,38
24,55	2972	77,50	67,20	66,80	175,29	0,302	0,059	0,241	0,40
31,59	3602	84,20	74,37	73,98	175,17	0,300	0,056	0,242	0,38
42,29	4715	95,79	85,33	84,86	174,86	0,306	0,060	0,243	0,46

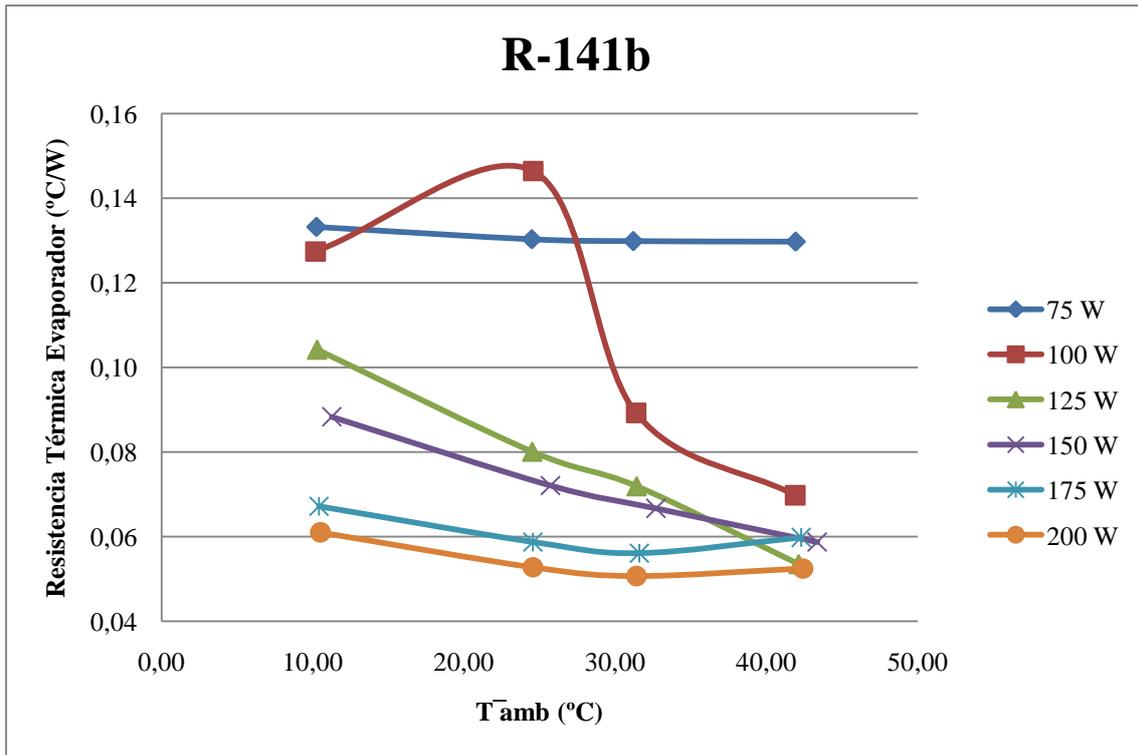
Tabla 6.5-4 Resultado numérico del ensayo con R-141b y 175 W, carga del 90% y posición vertical.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,50	2349	71,18	58,90	58,53	201,31	0,301	0,061	0,239	10,50
24,55	3520	84,16	73,56	73,20	200,77	0,297	0,053	0,242	24,55
31,40	4215	90,85	80,69	80,27	200,45	0,297	0,051	0,244	31,40
42,41	5486	102,42	91,95	91,51	199,47	0,301	0,052	0,246	42,41

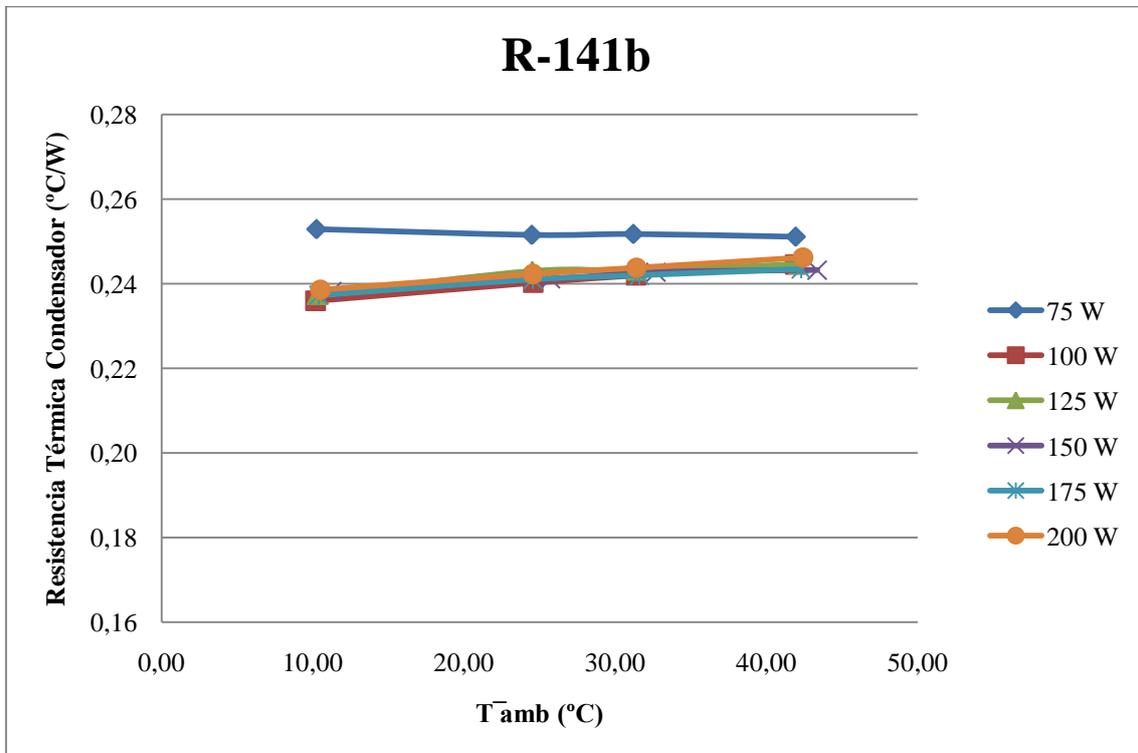
Tabla 6.5-5 Resultado numérico del ensayo con R-141b y 200 W, carga del 90% y posición vertical.



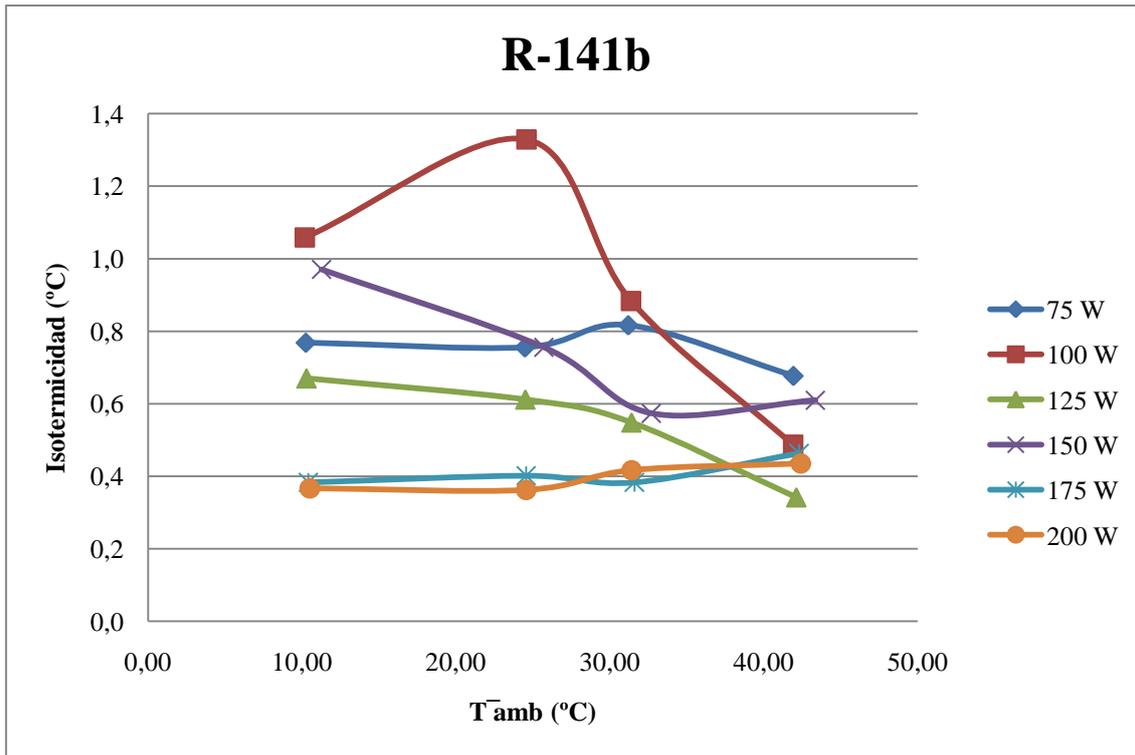
Gráfica 6.5-1 Variación de la resistencia térmica global con respecto a la temperatura de la cámara climática y al flujo de calor.



Gráfica 6.5-2 Variación de la resistencia térmica en el evaporador con respecto a la temperatura de la cámara climática y al flujo de calor.



Gráfica 6.5-3 Variación de la resistencia térmica en el condensador con respecto a la temperatura de la cámara climática y al flujo de calor.



Gráfica 6.5-4 Variación de la isotermitad con respecto a la temperatura de la cámara climática y al flujo de calor.

6.5.1.2 Fluido de trabajo N-Hexano⁶

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,30	225	42,73	30,47	29,24	75,16	0,431	0,163	0,252	1,22
24,91	418	57,62	44,79	43,78	74,97	0,436	0,171	0,252	1,01
31,71	541	64,60	51,63	50,47	74,89	0,439	0,173	0,250	1,17
42,35	784	75,05	62,34	61,07	74,79	0,437	0,170	0,250	1,27

Tabla 6.5-6 Resultado numérico del ensayo con N-hexano y 75 W, carga del 90% y posición vertical.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,29	298	51,62	37,03	35,80	100,43	0,412	0,145	0,254	1,23
24,90	526	66,03	51,18	49,74	100,19	0,411	0,148	0,248	1,44
31,76	671	73,15	58,04	56,52	100,07	0,414	0,151	0,247	1,52
42,16	946	81,27	68,03	66,80	99,99	0,391	0,132	0,246	1,23

Tabla 6.5-7 Resultado numérico del ensayo con N-hexano y 100 W, carga del 90% y posición vertical.

⁶ Los resultados numéricos del ensayo con N-hexano a 150 W, carga del 90% y en posición vertical se aportan en la Tabla 6.3-35.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,30	362	55,98	41,38	40,44	125,17	0,365	0,117	0,241	0,94
24,78	623	75,53	55,67	54,44	124,94	0,406	0,159	0,237	1,23
31,72	792	79,99	62,89	61,42	124,78	0,387	0,137	0,238	1,46
42,32	1114	83,86	72,78	72,20	124,66	0,333	0,089	0,240	0,57

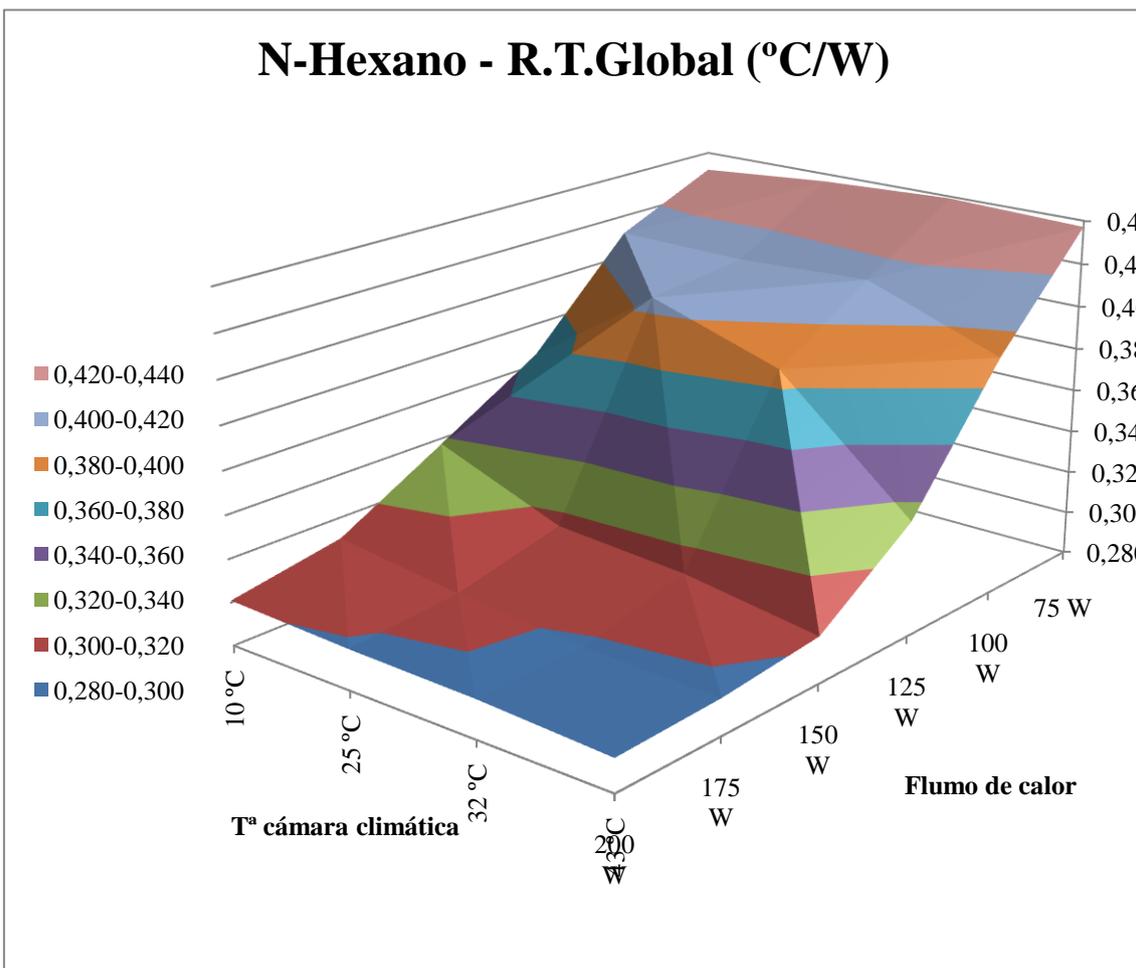
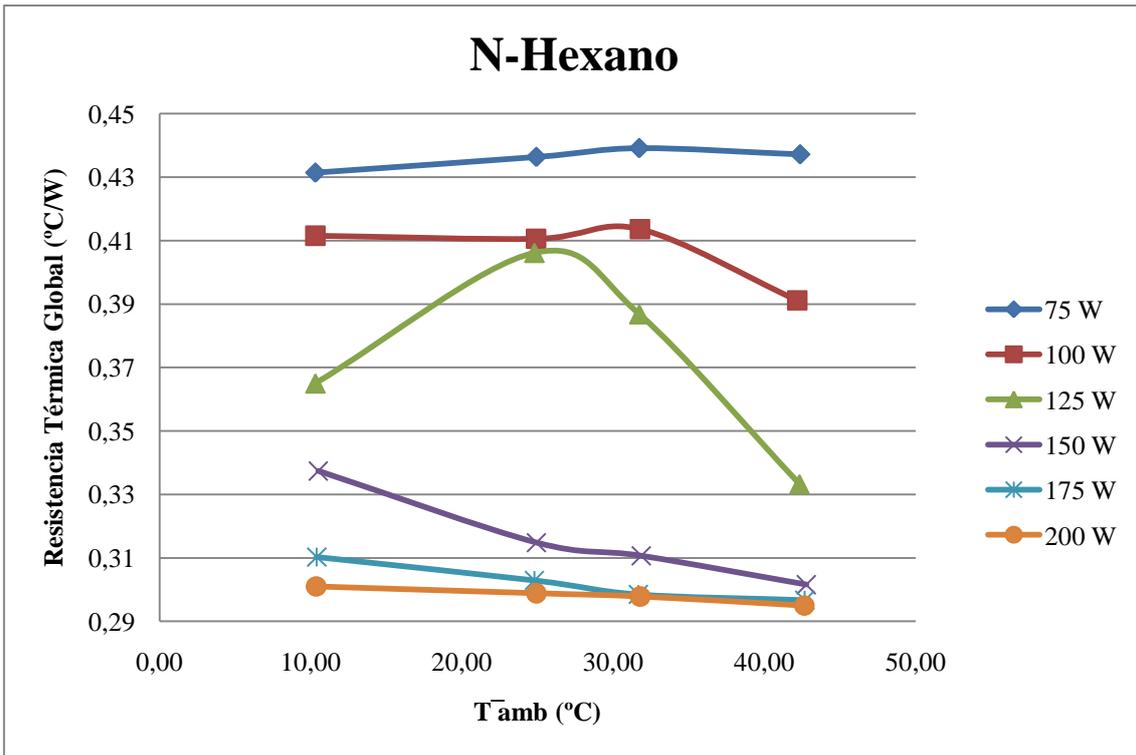
Tabla 6.5-8 Resultado numérico del ensayo con N-hexano y 125 W, carga del 90% y posición vertical.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,39	555	65,01	52,04	51,53	176,05	0,310	0,074	0,234	0,51
24,78	921	77,81	66,57	66,13	175,07	0,303	0,064	0,236	0,44
31,66	1149	83,98	73,57	73,09	175,28	0,298	0,059	0,236	0,47
42,66	1578	94,48	84,38	83,99	174,65	0,297	0,058	0,237	0,40

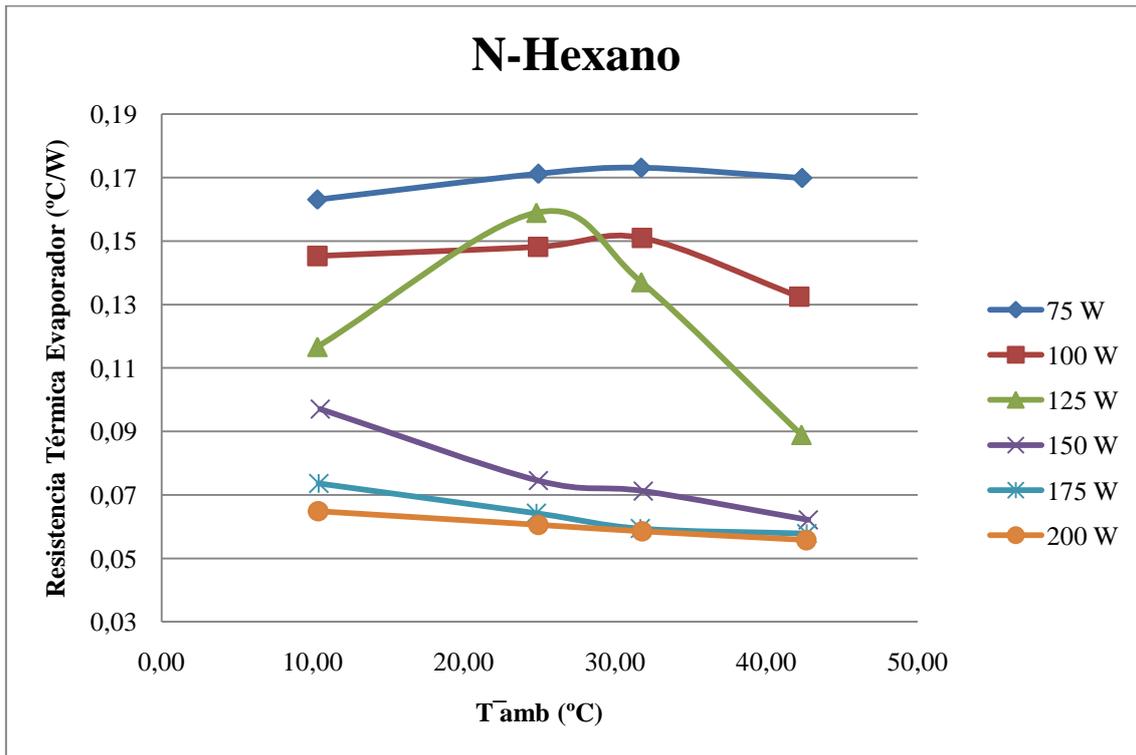
Tabla 6.5-9 Resultado numérico del ensayo con N-hexano y 175 W, carga del 90% y posición vertical.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,35	688	70,87	57,83	57,44	201,05	0,301	0,065	0,234	0,38
24,91	1120	84,81	72,68	72,25	200,43	0,299	0,061	0,236	0,43
31,77	1377	91,21	79,53	79,11	199,55	0,298	0,059	0,237	0,42
42,63	1868	101,60	90,45	90,01	199,91	0,295	0,056	0,237	0,44

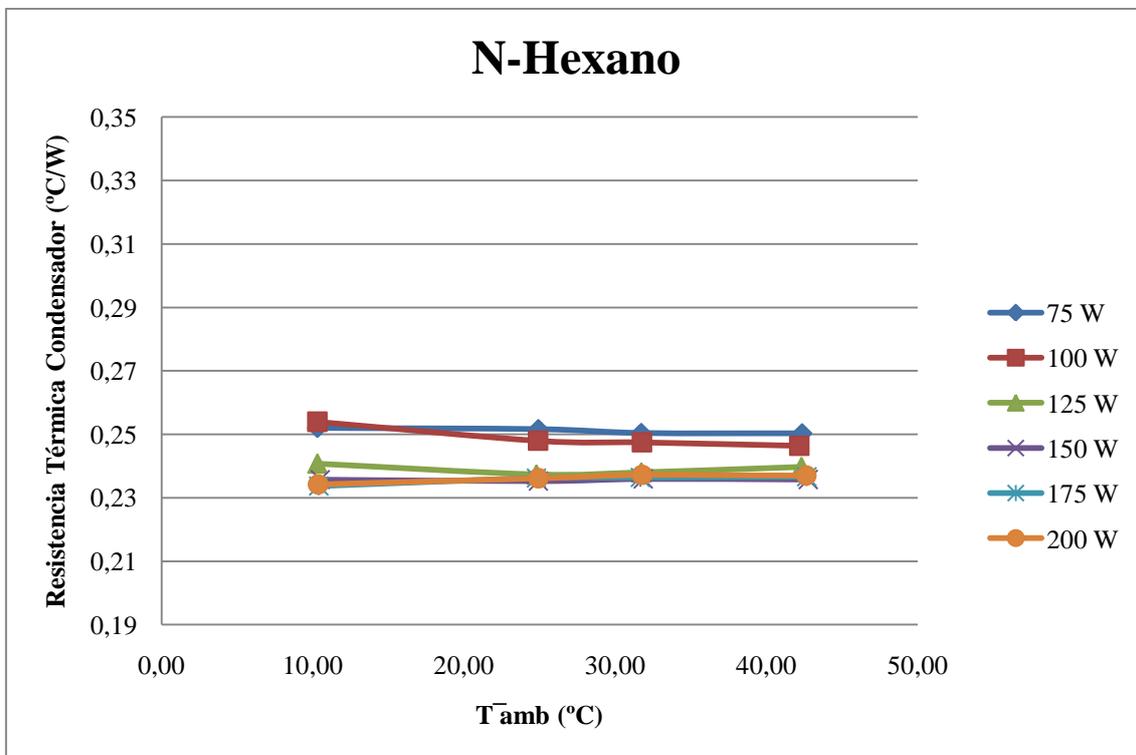
Tabla 6.5-10 Resultado numérico del ensayo con N-hexano y 200 W, carga del 90% y posición vertical.



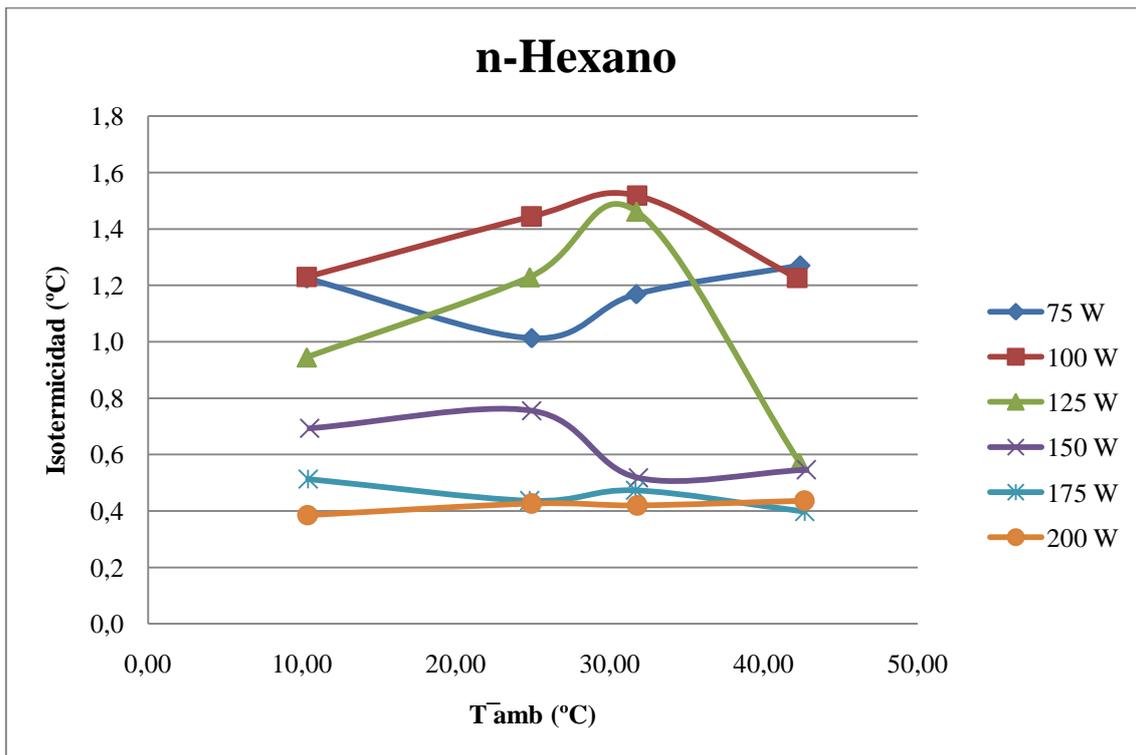
Gráfica 6.5-5 Variación de la resistencia térmica global con respecto a la temperatura de la cámara climática y al flujo de calor.



Gráfica 6.5-6 Variación de la resistencia térmica en el evaporador con respecto a la temperatura de la cámara climática y al flujo de calor.



Gráfica 6.5-7 Variación de la resistencia térmica en el condensador con respecto a la temperatura de la cámara climática y al flujo de calor.



Gráfica 6.5-8 Variación de la isotermicidad con respecto a la temperatura de la cámara climática y al flujo de calor.

6.5.2 Orientación del termosifón

Se va a analizar el comportamiento del termosifón con la variación de la inclinación del propio prototipo y la temperatura de la cámara climática, para dos fluidos de trabajo. Se han realizado ensayos para tres inclinaciones, 60°, 80° y en posición vertical (los grados de inclinación vienen definidos por la horizontal del suelo y el eje del termosifón). Las siguientes condiciones de trabajo se han mantenido constantes en todos los ensayos:

- Carga del fluido de trabajo al 90%.
- Flujo de calor entrante por el evaporador de 150 W.

6.5.2.1 Fluido de trabajo R-141b⁷

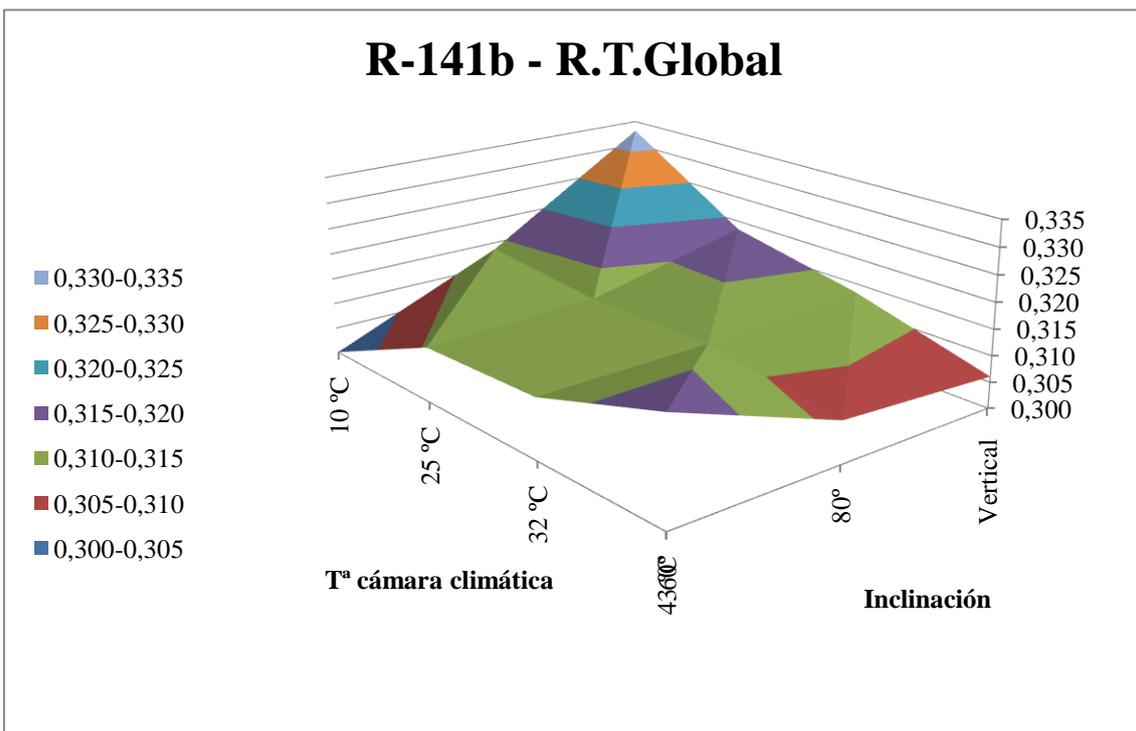
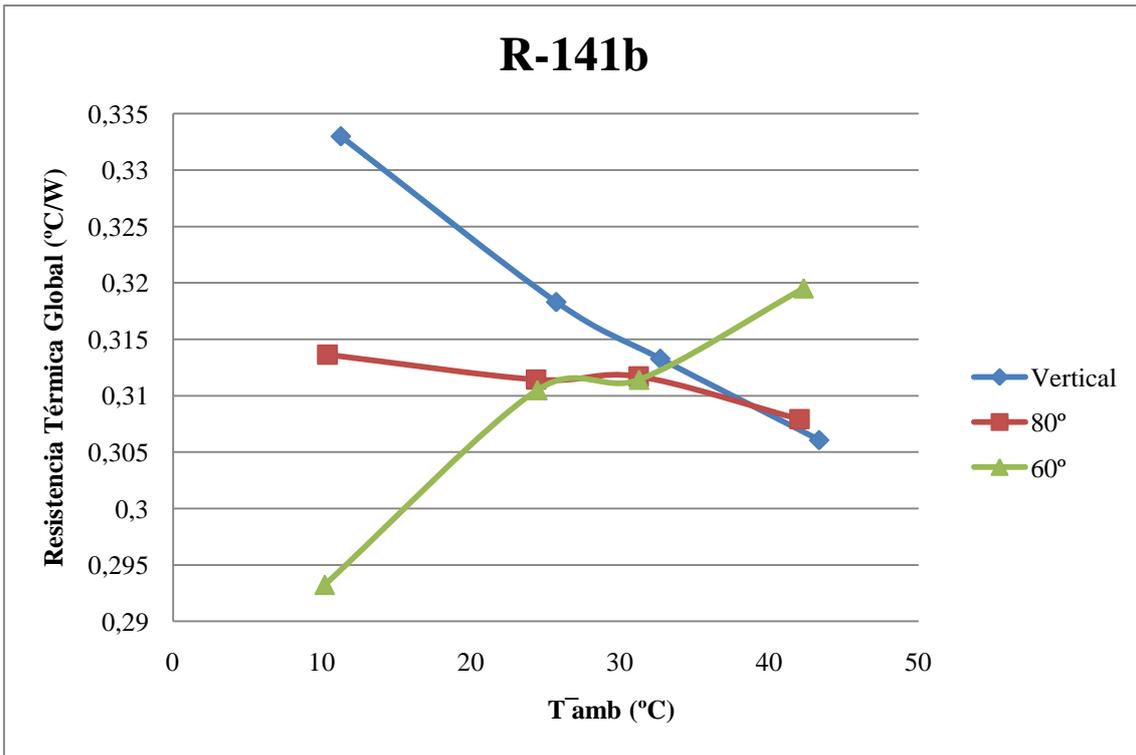
\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,35	1652	57,47	47,32	46,80	150,22	0,314	0,068	0,243	0,53
24,35	2563	70,98	61,88	61,36	149,71	0,311	0,061	0,247	0,53
31,23	3118	77,87	68,91	68,53	149,63	0,312	0,060	0,249	0,38
42,02	4126	88,08	79,83	79,34	149,58	0,308	0,055	0,250	0,49

Tabla 6.5-11 Resultado numérico del ensayo con R-141b e inclinación de 80°, carga del 90% y 150 W.

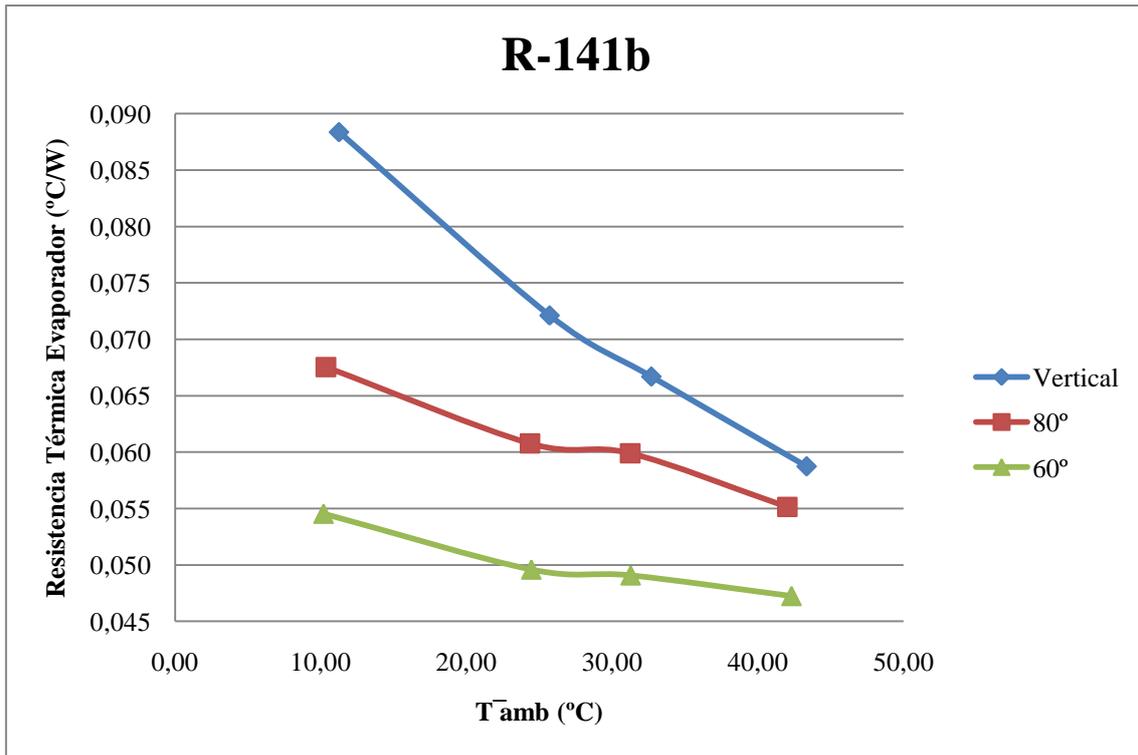
\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,18	1594	54,25	46,05	45,70	150,28	0,293	0,055	0,236	0,35
24,44	2649	71,02	63,58	62,70	149,99	0,310	0,050	0,255	0,88
31,27	3223	77,93	70,57	69,84	149,84	0,311	0,049	0,257	0,74
42,30	4402	90,04	82,98	82,24	149,39	0,320	0,047	0,267	0,73

Tabla 6.5-12 Resultado numérico del ensayo con R-141b e inclinación de 60°, carga del 90% y 150 W.

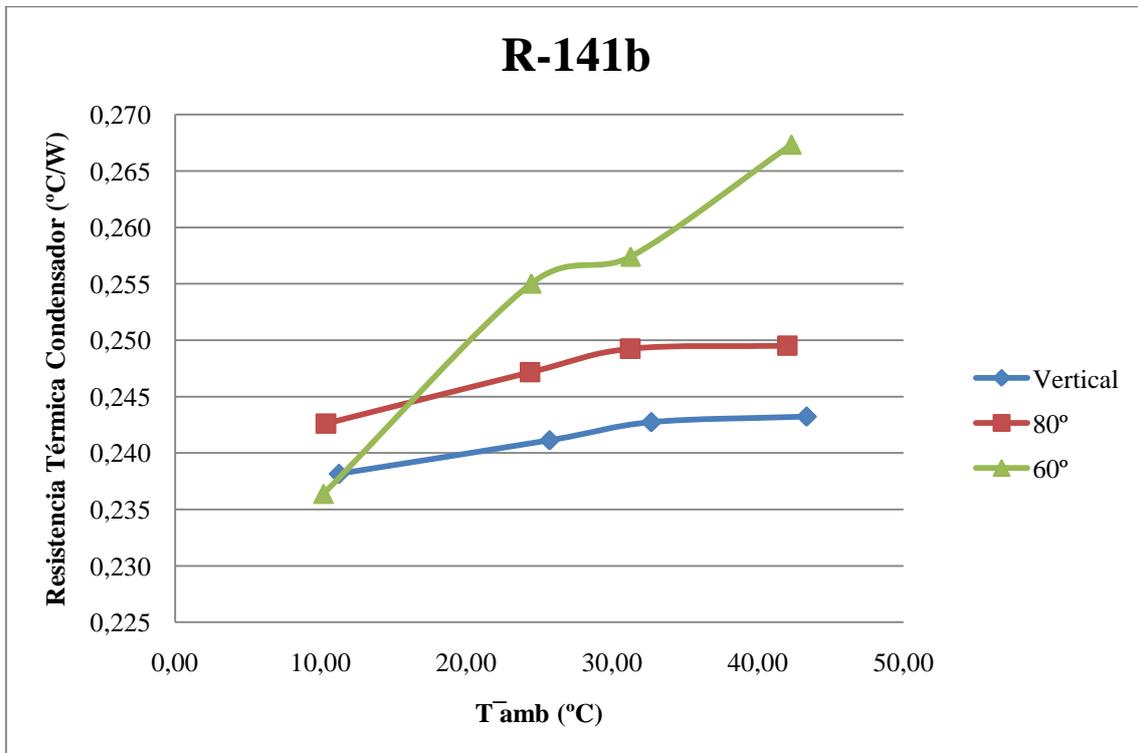
⁷ Los resultados numéricos del ensayo con R-141b a 150 W, carga del 90% y en posición vertical se aportan en la Tabla 6.3-41.



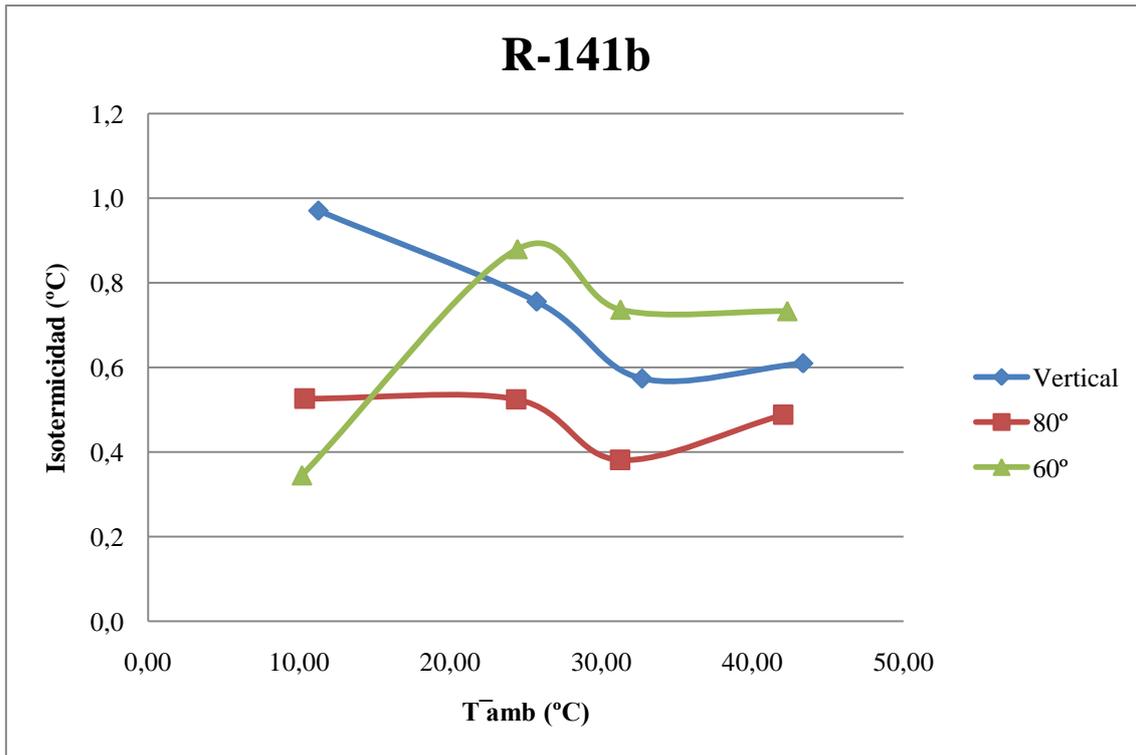
Gráfica 6.5-9 Variación de la resistencia térmica global con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la inclinación.



Gráfica 6.5-10 Variación de la resistencia térmica en el evaporador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la inclinación.



Gráfica 6.5-11 Variación de la resistencia térmica en el condensador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la inclinación.



Gráfica 6.5-12 Variación de la isotermicidad con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la inclinación.

6.5.2.2 Fluido de trabajo N-Hexano^{8,9}

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,27	503	59,35	49,65	48,79	150,14	0,327	0,065	0,257	0,87
24,56	860	74,53	64,64	63,81	149,94	0,333	0,066	0,262	0,83
31,38	1066	79,93	71,00	70,42	149,78	0,324	0,060	0,261	0,58
42,10	1461	89,02	81,59	80,96	149,60	0,314	0,050	0,260	0,63

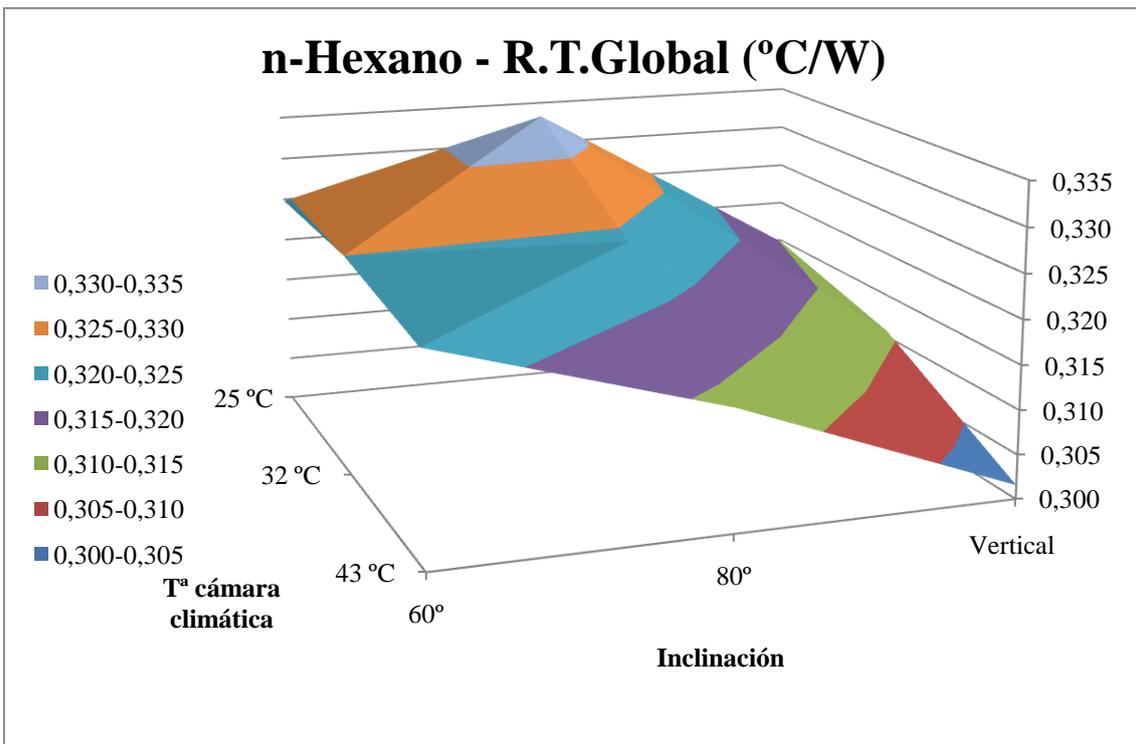
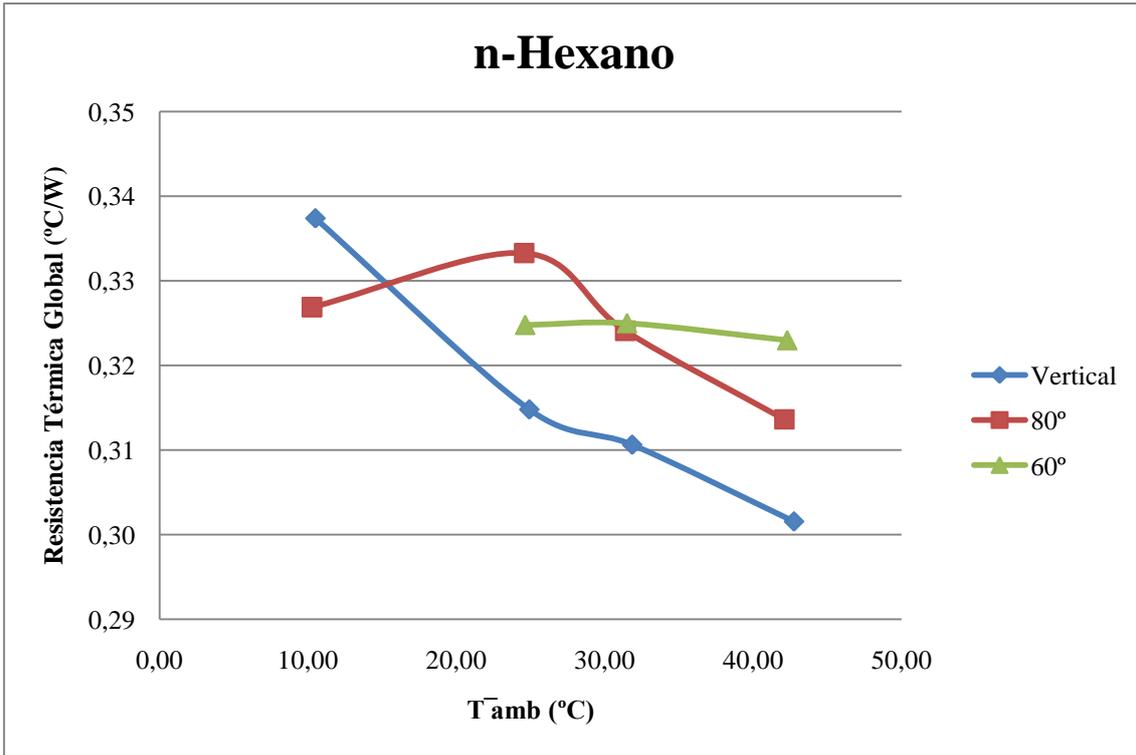
Tabla 6.5-13 Resultado numérico del ensayo con N-hexano e inclinación de 80°, carga del 90% y 150 W.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
24,62	878	73,34	66,02	64,46	150,01	0,325	0,049	0,266	1,56
31,49	1091	80,18	72,40	71,33	149,82	0,325	0,052	0,266	1,08
42,28	1502	90,62	83,02	81,95	149,67	0,323	0,051	0,265	1,07

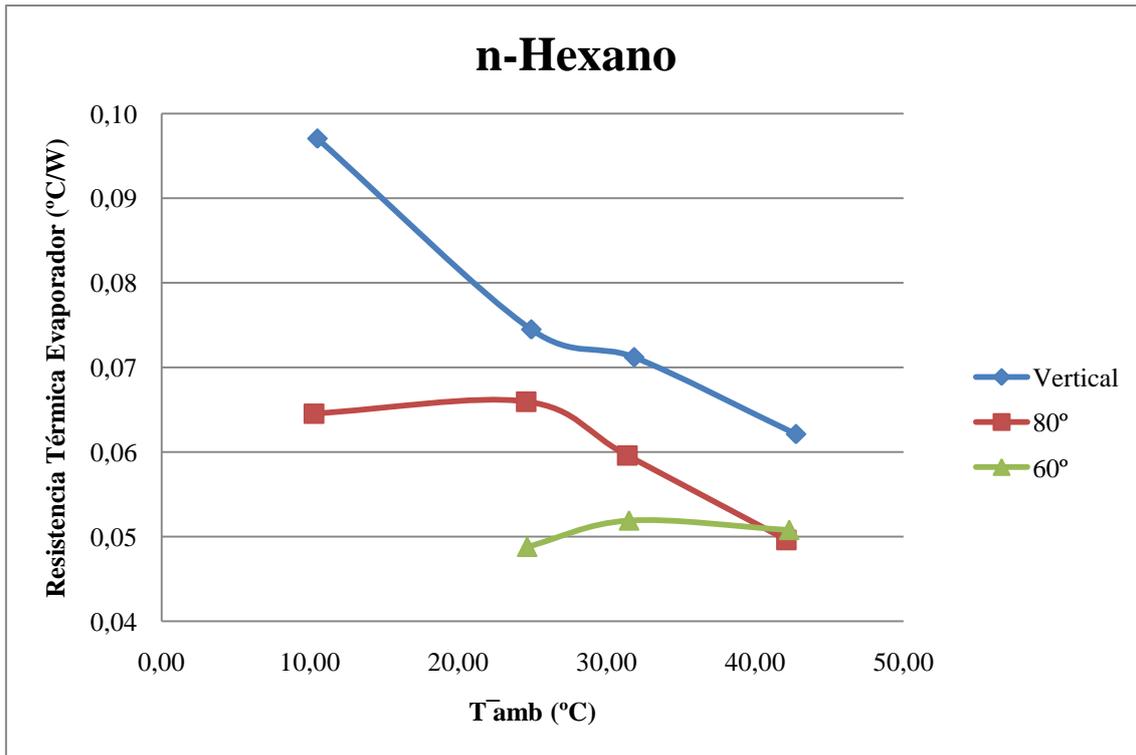
Tabla 6.5-14 Resultado numérico del ensayo con N-hexano e inclinación de 60°, carga del 90% y 150 W.

⁸ Los resultados numéricos del ensayo con N-hexano a 150 W, carga del 90% y en posición vertical se aportan en la Tabla 6.3-35.

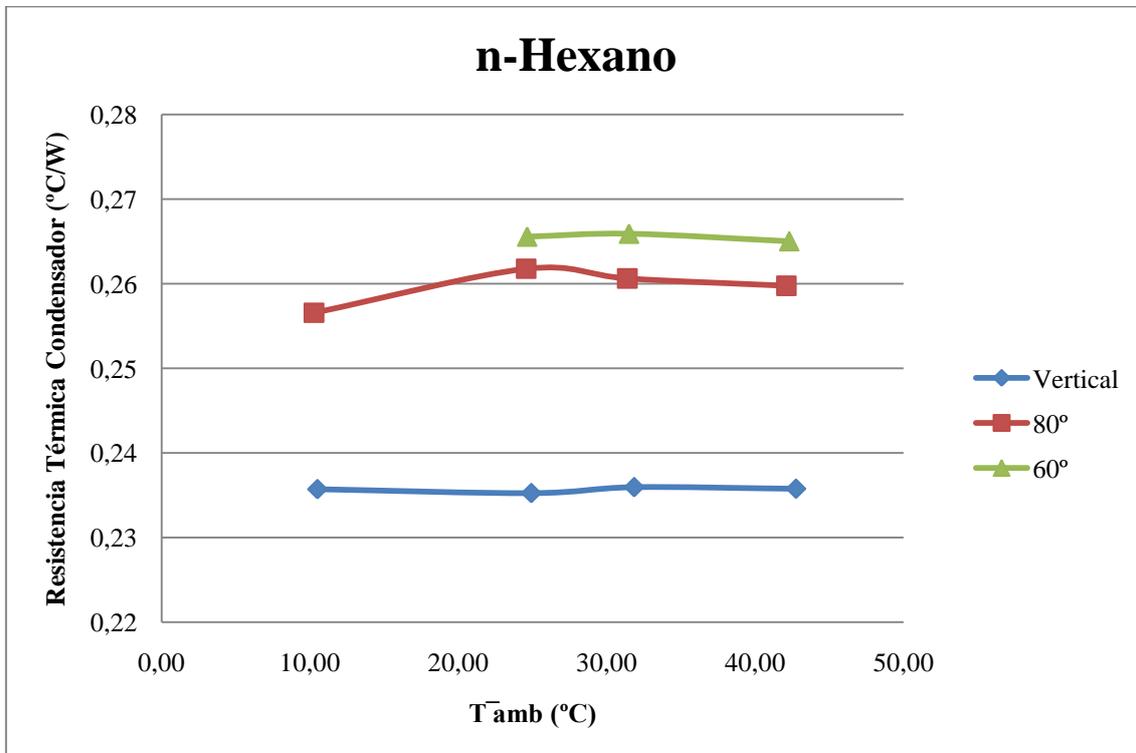
⁹ En el ensayo con inclinación de 60°, en el tramo de 10 °C, la tensión aportada por la fuente de alimentación subió unas décimas, lo que ha falseado el resultado. No se ha incluido este conjunto de datos.



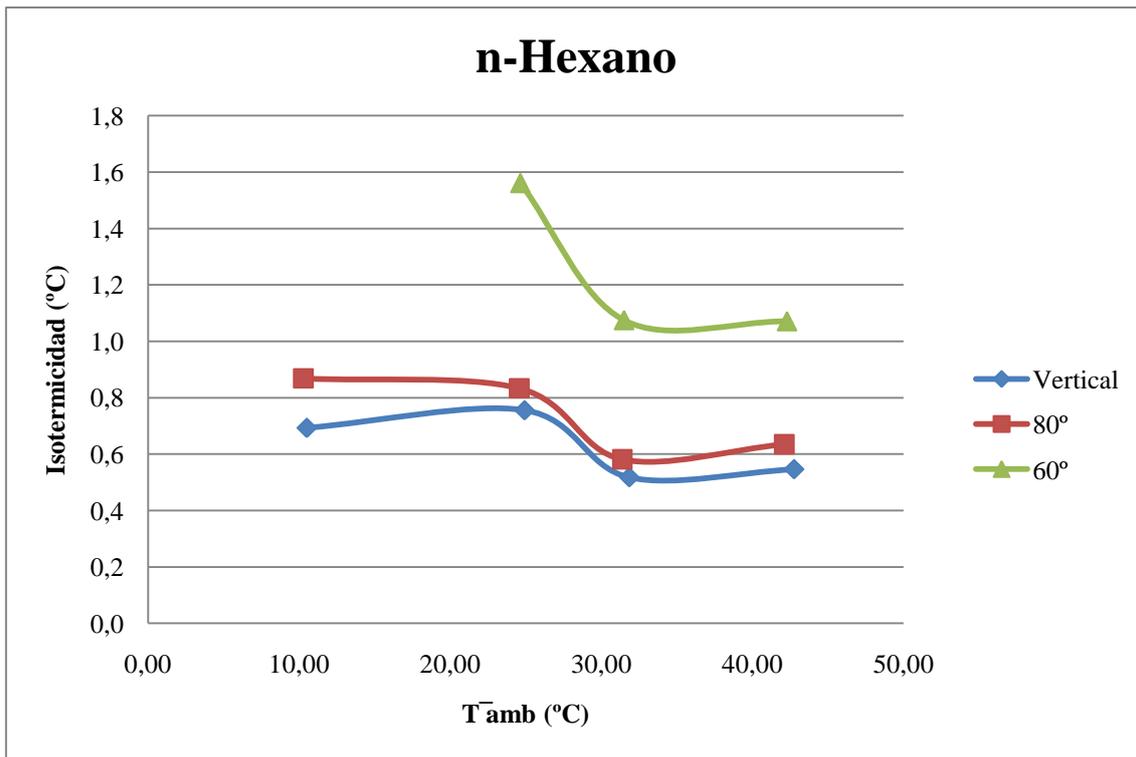
Gráfica 6.5-13 Variación de la resistencia térmica global con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la inclinación.



Gráfica 6.5-14 Variación de la resistencia térmica en el evaporador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la inclinación.



Gráfica 6.5-15 Variación de la resistencia térmica en el condensador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la inclinación.



Gráfica 6.5-16 Variación de la isotermicidad con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la inclinación.

7 OTRAS CONSIDERACIONES

Se va a estudiar el comportamiento del termosifón según otros parámetros. Por un lado se han repetido los ensayos con el agua como fluido de trabajo. Estos ensayos se van a comparar con los ensayos con agua realizados previamente. Ya que ambos grupos de ensayos se han realizado en las mismas condiciones de trabajo (temperatura, flujo de calor, carga y posición del termosifón) y mismo fluido, se podrá analizar la repetitividad de los ensayos realizados en este proyecto.

Otro aspecto que se va a considerar es el comportamiento del termosifón al variar la presión en su interior además de otras propiedades de los fluidos de trabajo ensayados. Durante cada ensayo se ha hecho trabajar al prototipo de termosifón cilíndrico a una serie de temperaturas, lo cual ha llevado a que en el interior del prototipo se fueran alcanzando diferentes presiones.

Finalmente, se va a ordenar todos los ensayos llevados a cabo en este proyecto según la resistencia térmica global (R_g).

7.1 REPETITIVIDAD

Se va a analizar la repetitividad de los ensayos realizados en este proyecto comparando los ensayos llevados a cabo con el agua, expuestos en la apartado 6.3.3, con otros ensayos con agua como fluido de trabajo que se presentan a continuación.

En las siguientes tablas, se presentan los resultados numéricos de las repeticiones de los ensayos con agua como fluido de trabajo, para las cargas del 50% 70% y 90%, flujo de calor de 150W y el termosifón en posición vertical.

La comparación entre ensayos se va a realizar representando en gráficas el valor de las resistencias térmicas e isothermicidad, definidas en la sección 6.2, frente a la temperatura ambiente media (\bar{T}_{amb}) de la cámara climática.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,12	110	55,20	49,74	46,01	149,78	0,301	0,036	0,240	3,73
24,83	198	65,18	60,87	58,92	150,87	0,267	0,029	0,226	1,956
31,77	281	72,09	67,76	66,26	150,57	0,268	0,029	0,229	1,497
42,65	450	82,97	78,28	77,08	150,18	0,269	0,031	0,229	1,203

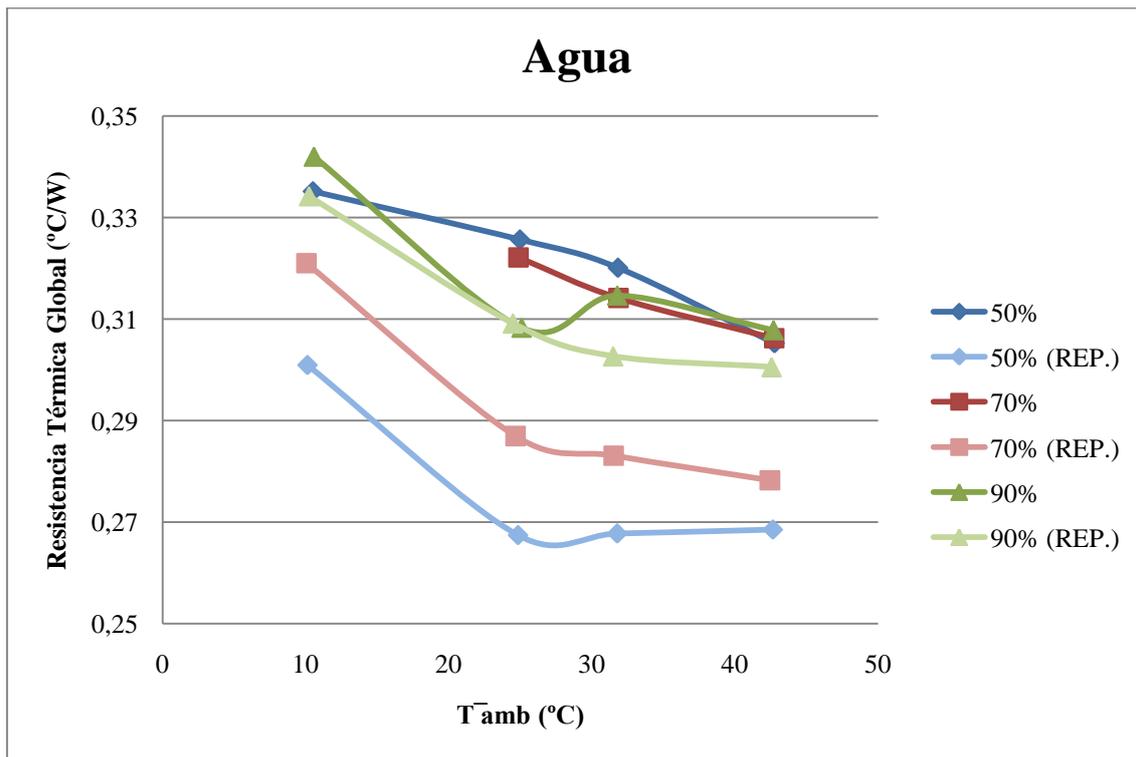
Tabla 7.1-1 Resultado numérico de la repetición del ensayo con agua al 50%, 150 W y posición vertical.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,05	101	58,32	48,36	45,50	150,37	0,321	0,066	0,236	2,861
24,65	200	67,75	61,02	58,73	150,18	0,287	0,045	0,227	2,287
31,52	272	73,92	67,52	65,55	149,77	0,283	0,043	0,227	1,965
42,43	432	84,00	77,91	76,15	149,38	0,278	0,041	0,226	1,762

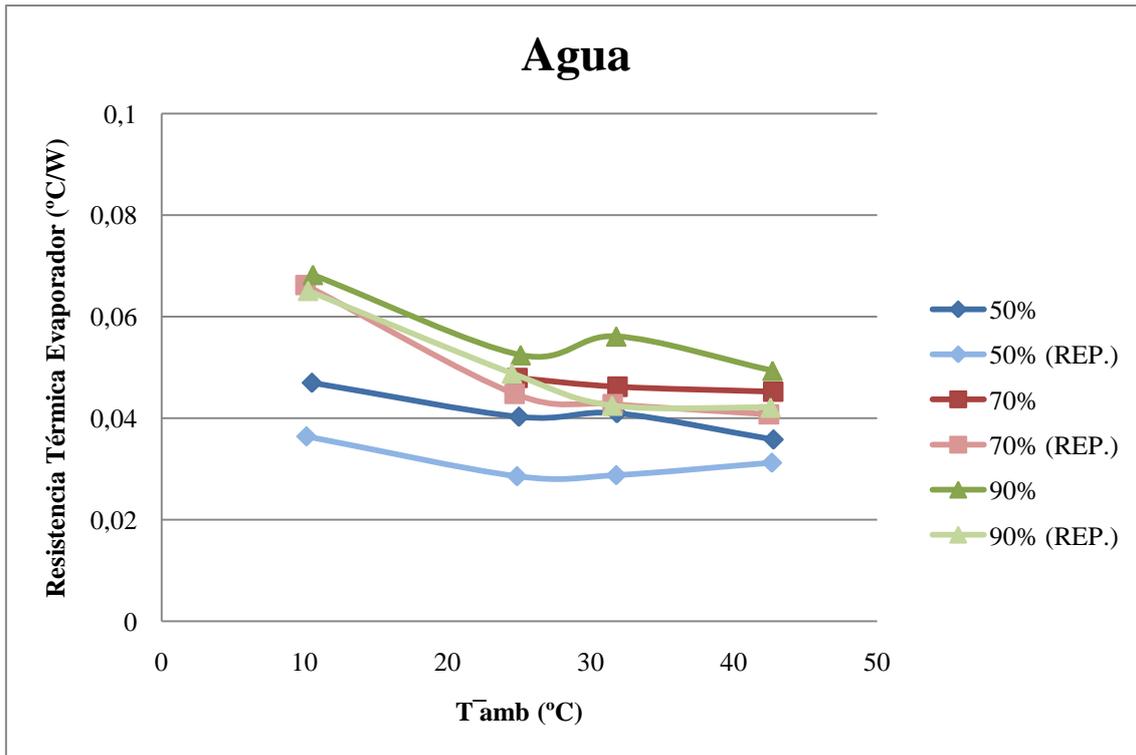
Tabla 7.1-2 Resultado numérico de la repetición del ensayo con agua al 70%, 150 W y posición vertical.

\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{Pres} (mbar)	\bar{T}_r (°C)	$\bar{T}_{dep.inf}$ (°C)	$\bar{T}_{dep.sup}$ (°C)	\overline{Pot} (W)	R_g (°C/W)	R_e (°C/W)	R_c (°C/W)	I (°C)
10,24	105	60,42	50,64	46,57	150,15	0,334	0,065	0,242	4,064
24,48	212	70,86	63,53	60,58	150,03	0,309	0,049	0,241	2,958
31,49	294	76,79	70,42	67,74	149,66	0,303	0,043	0,242	2,688
42,55	474	87,48	81,18	78,60	149,48	0,301	0,042	0,241	2,582

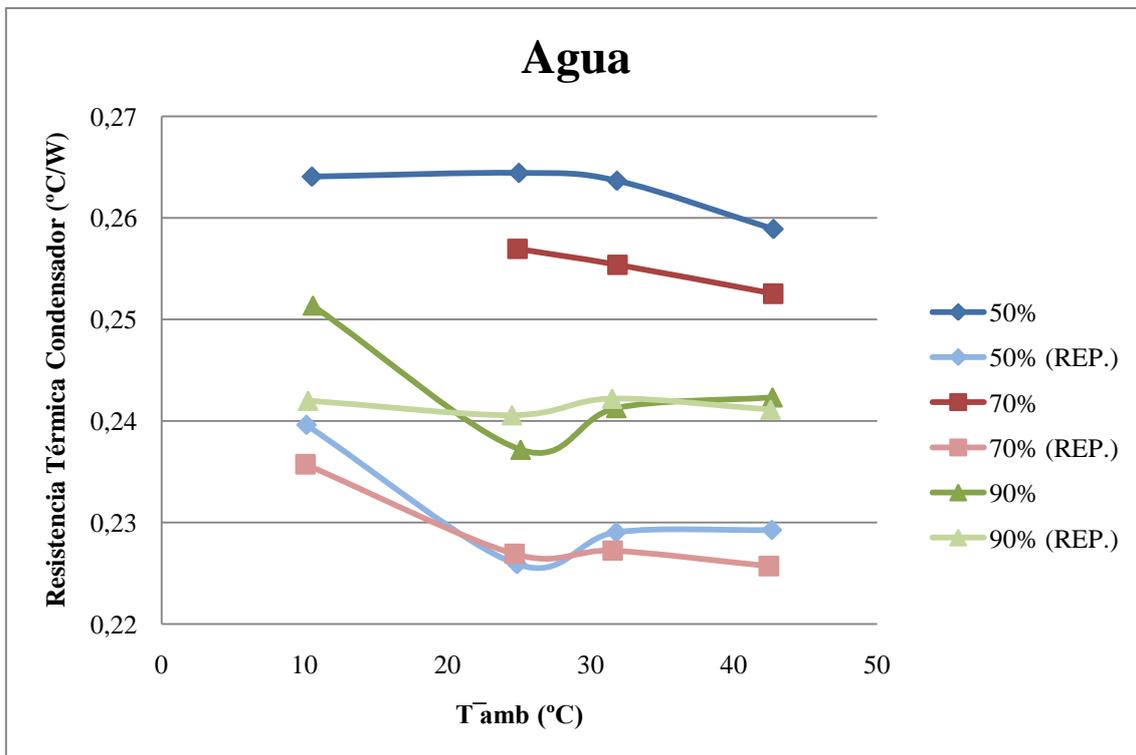
Tabla 7.1-3 Resultado numérico de la repetición del ensayo con agua al 90%, 150 W y posición vertical.



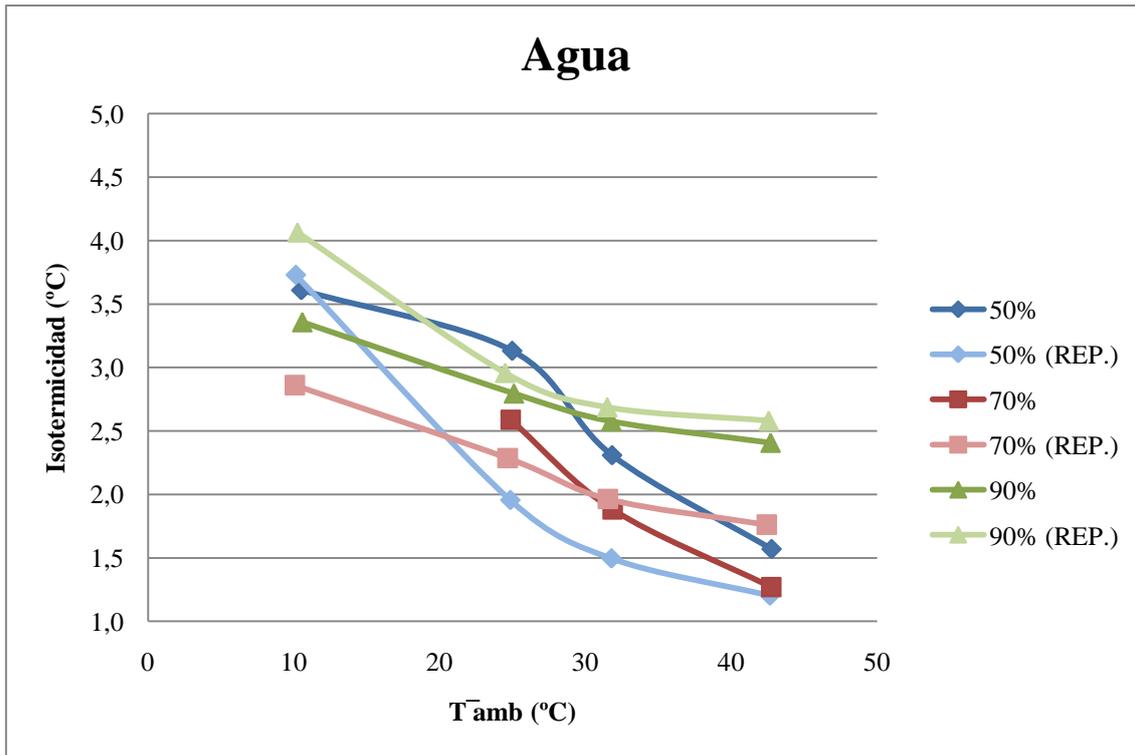
Gráfica 7.1-1 Variación de la resistencia térmica global con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 7.1-2 Variación de la resistencia térmica en el evaporador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 7.1-3 Variación de la resistencia térmica en el condensador con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.



Gráfica 7.1-4 Variación de la isothermicidad con respecto a la temperatura de la cámara climática y a la carga.

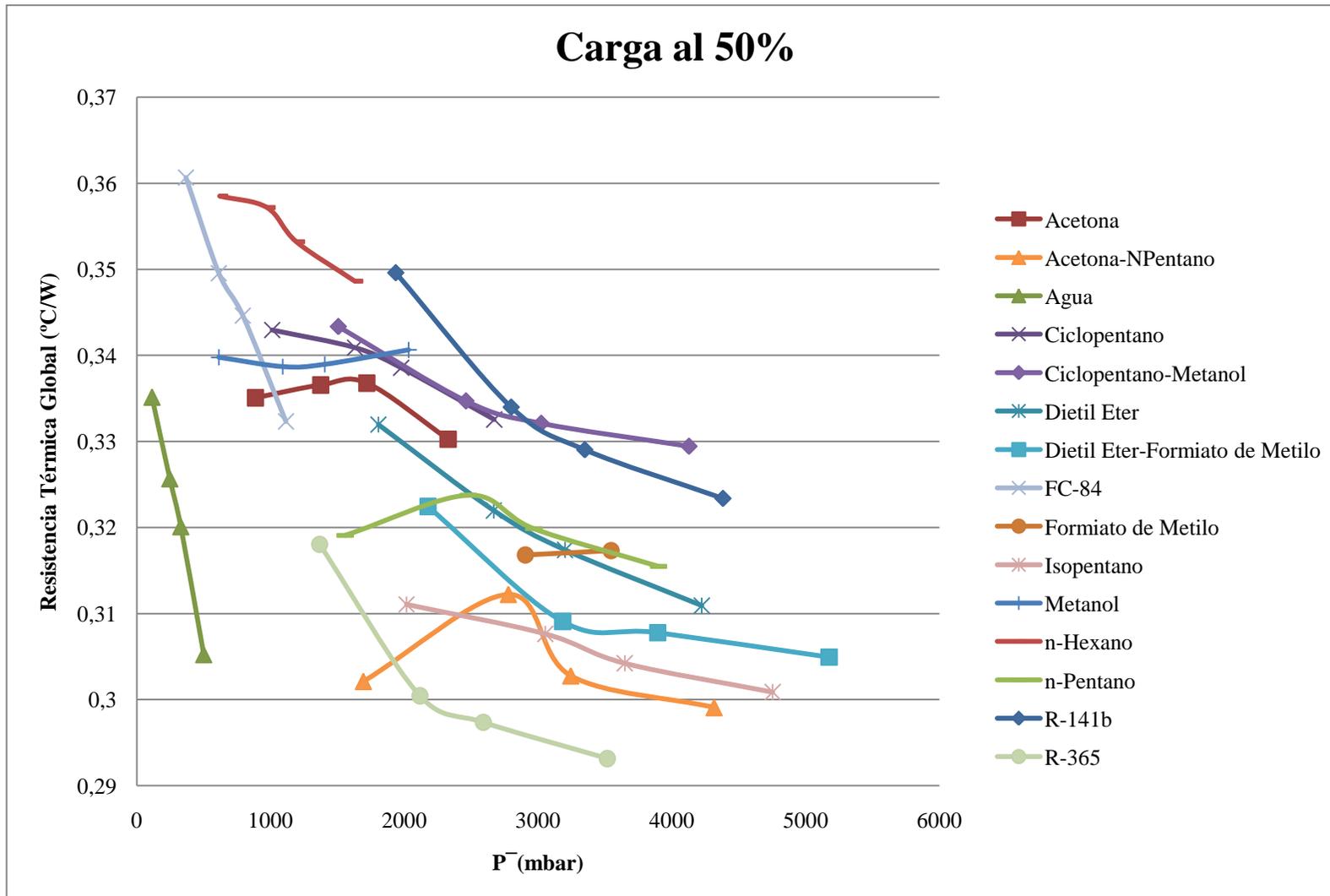
7.2 COMPORTAMIENTO DEL TERMOSIFÓN SEGÚN LA PRESIÓN EN SU INTERIOR Y EL FLUIDO DE TRABAJO

Se va a analizar el comportamiento del termosifón estudiando los cambios en su rendimiento al variar la presión del interior del termosifón y el fluido utilizado. Con este fin, se van a comparar los resultados de los ensayos realizados con todos los fluidos de trabajo para una carga determinada (50%, 70% o 90%), flujo de calor de 150 W y el termosifón en posición vertical.

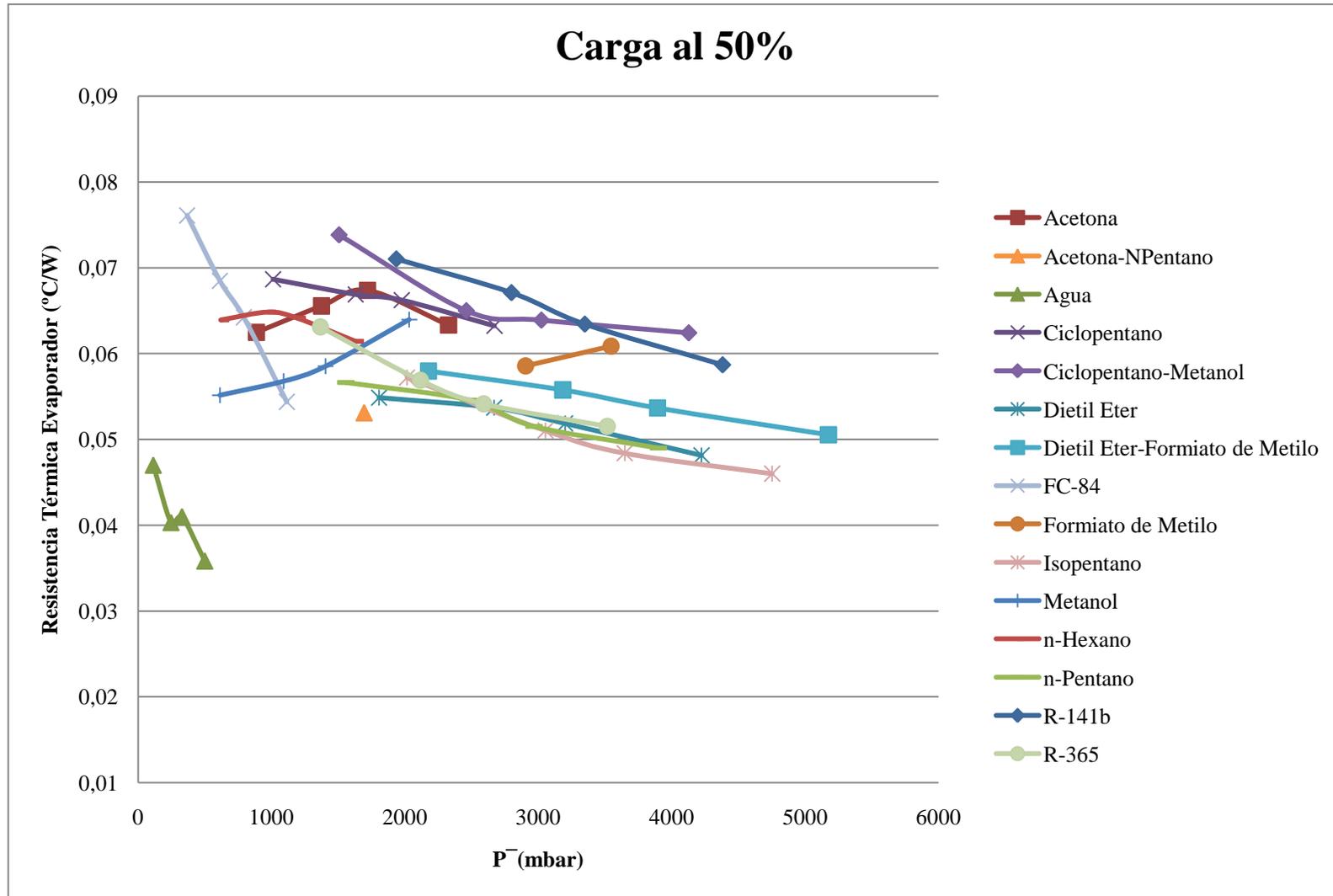
La comparación entre ensayos se va a realizar representando en gráficas el valor de las resistencias térmicas e isothermicidad, definidas en la sección 6.2, frente a la presión interior del termosifón media (\overline{Pres}).

El análisis se va a dividir en tres bloques, uno por cada carga de fluido de trabajo. Los resultados numéricos de los ensayos están expuestos en las tablas de la sección, 6.3.

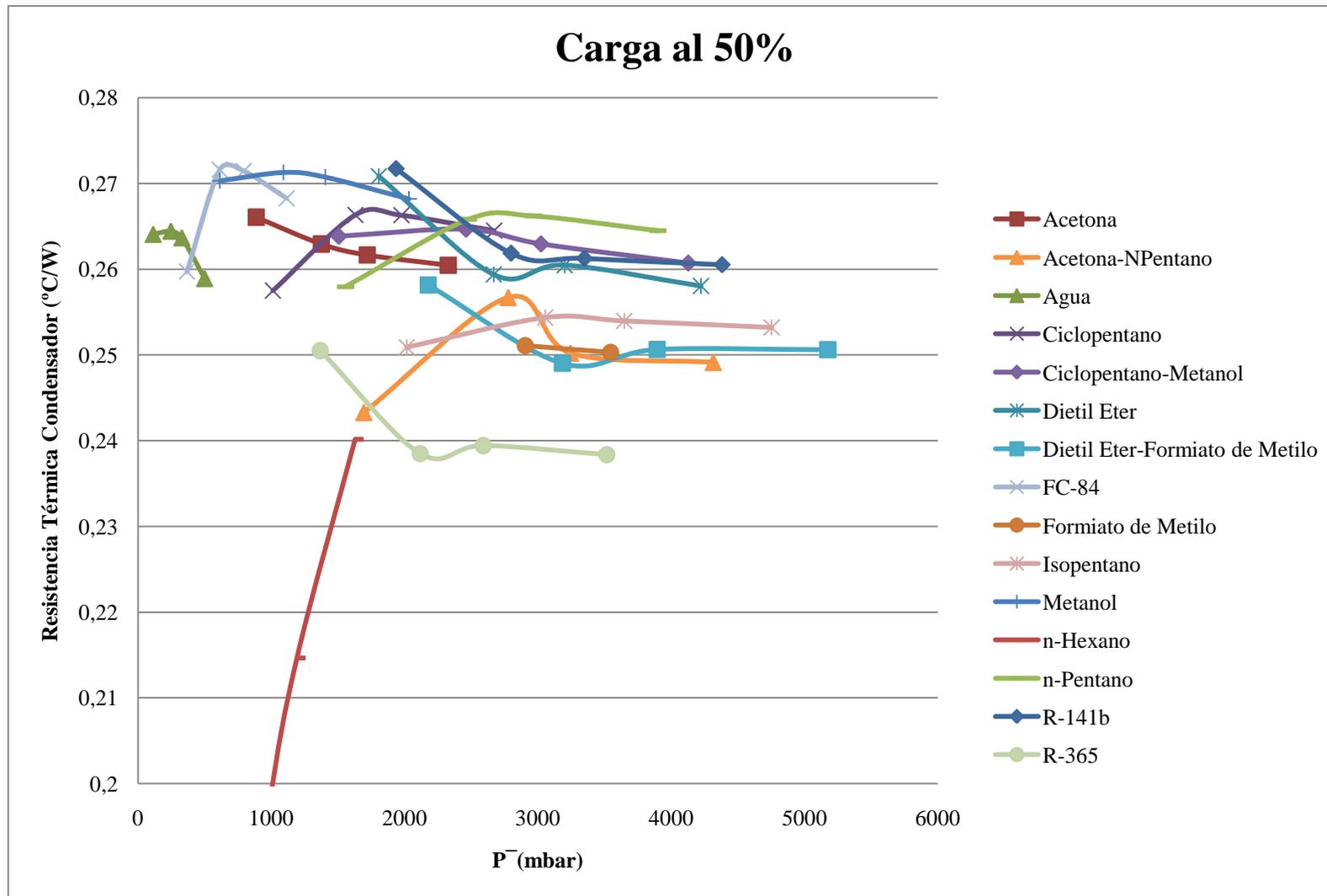
7.2.1.1 Bloque de ensayos al 50%



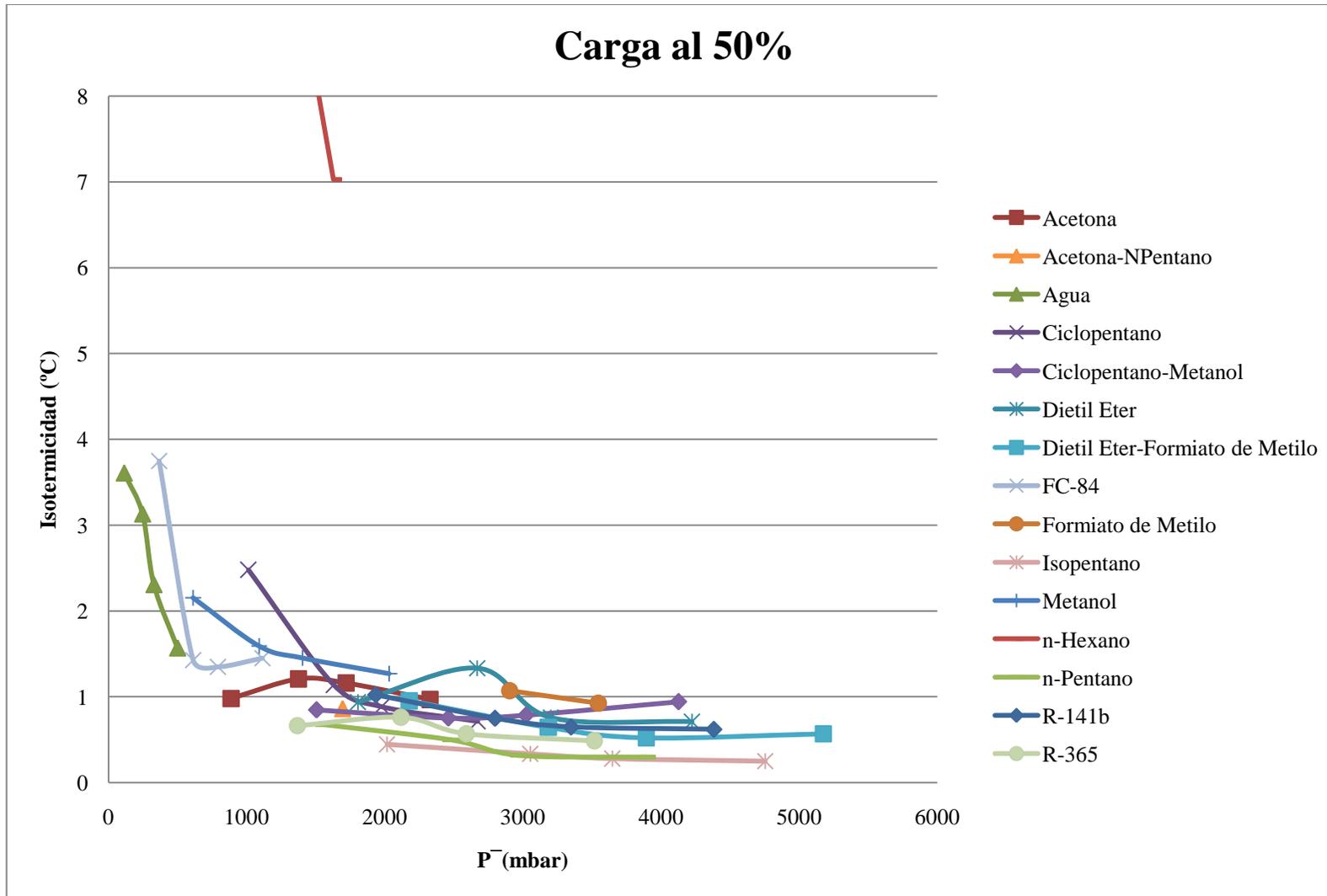
Gráfica 7.2-1 Variación de la resistencia térmica global con respecto a la presión del interior del termosifón y al fluido de trabajo con carga del 50%.



Gráfica 7.2-2 Variación de la resistencia térmica en el evaporador con respecto a la presión del interior del termosifón y al fluido de trabajo con carga del 50%.

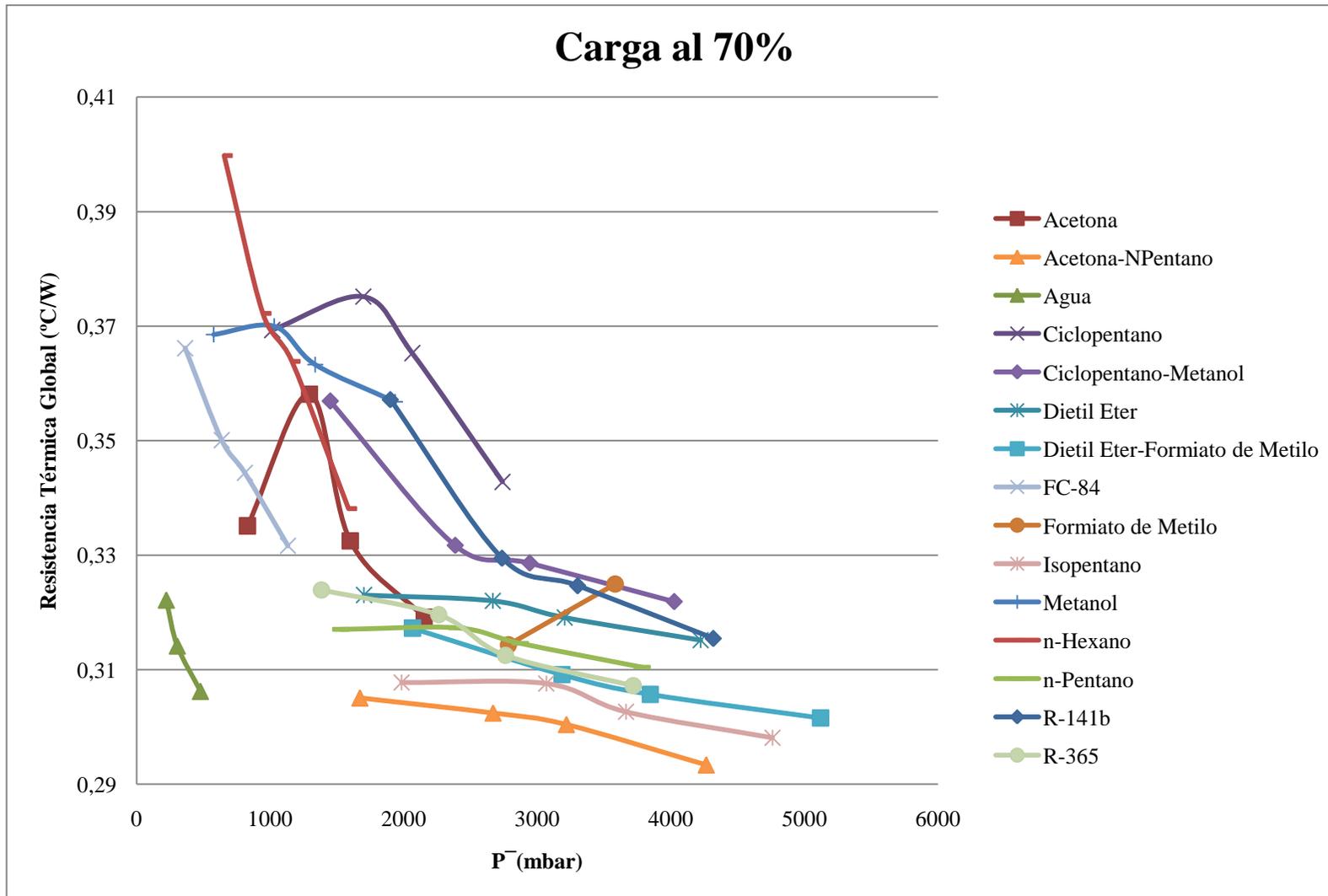


Gráfica 7.2-3 Variación de la resistencia térmica en el condensador con respecto a la presión del interior del termosifón y al fluido de trabajo con carga del 50%.

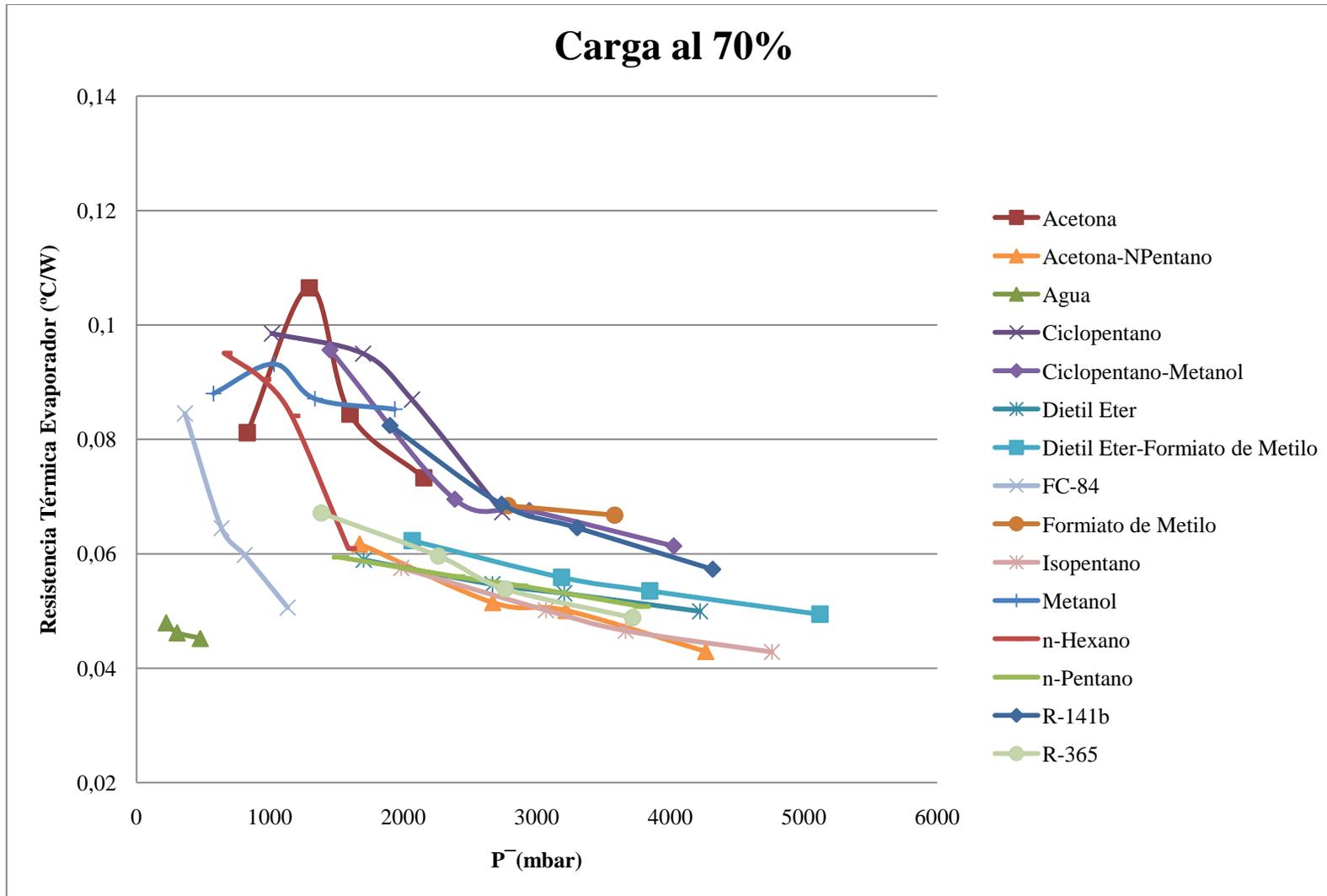


Gráfica 7.2-4 Variación de la isothermicidad con respecto a la presión del interior del termosifón y al fluido de trabajo con carga del 50%.

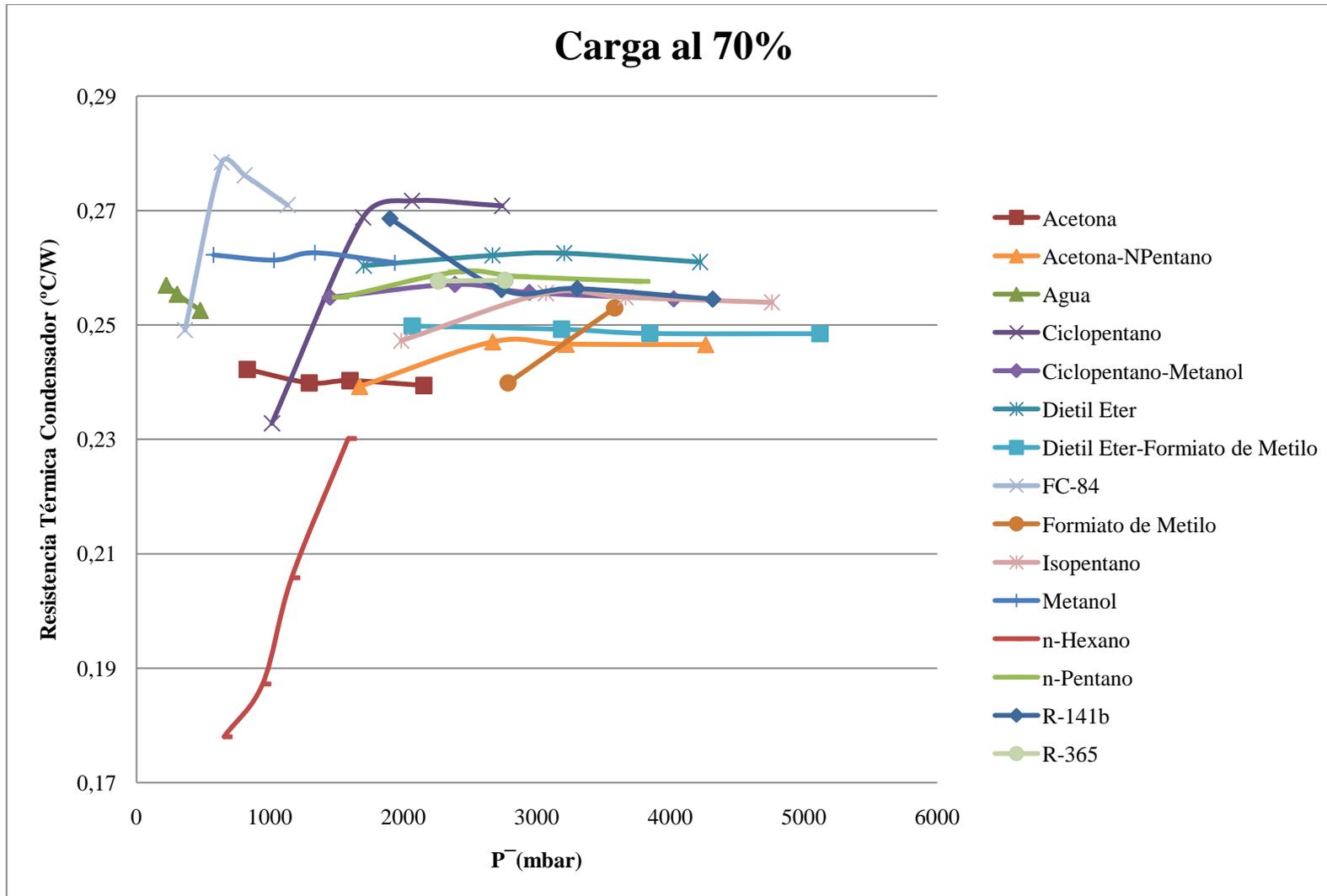
7.2.1.2 Bloque de ensayos al 70%



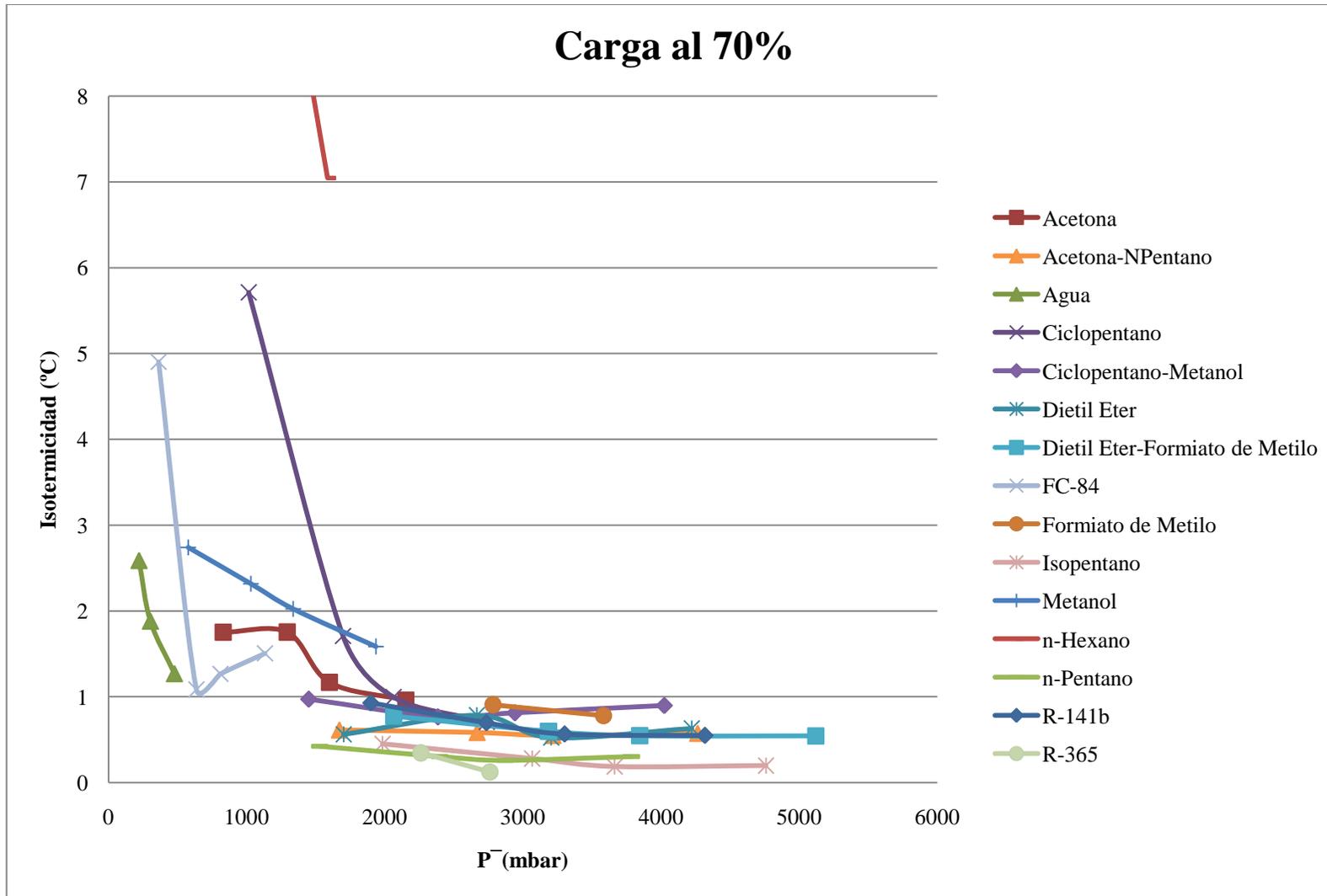
Gráfica 7.2-5 Variación de la resistencia térmica global con respecto a la presión del interior del termosifón y al fluido de trabajo con carga del 70%.



Gráfica 7.2-6 Variación de la resistencia térmica en el evaporador con respecto a la presión del interior del termosifón y al fluido de trabajo con carga del 70%.

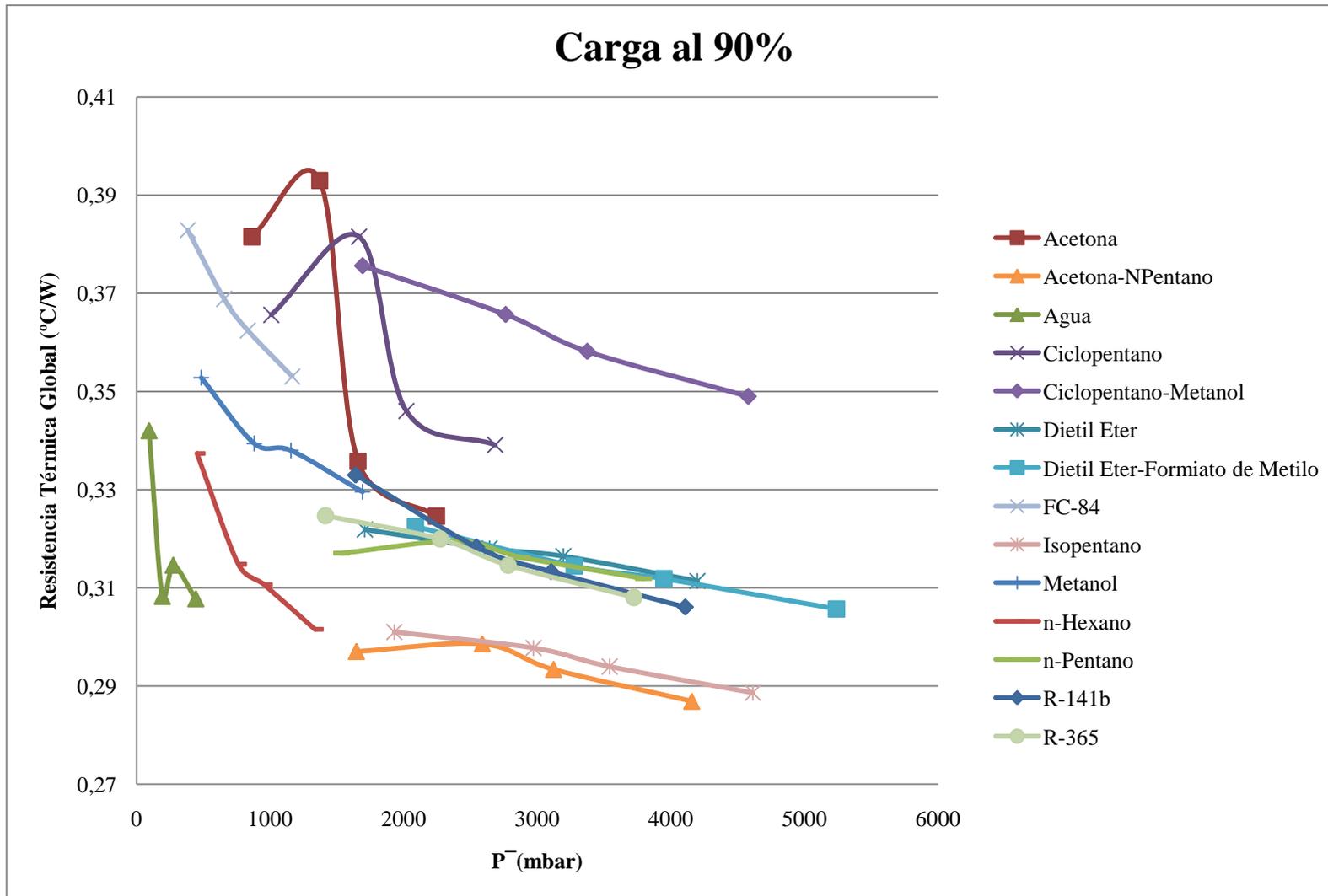


Gráfica 7.2-7 Variación de la resistencia térmica en el condensador con respecto a la presión del interior del termosifón y al fluido de trabajo con carga del 70%.

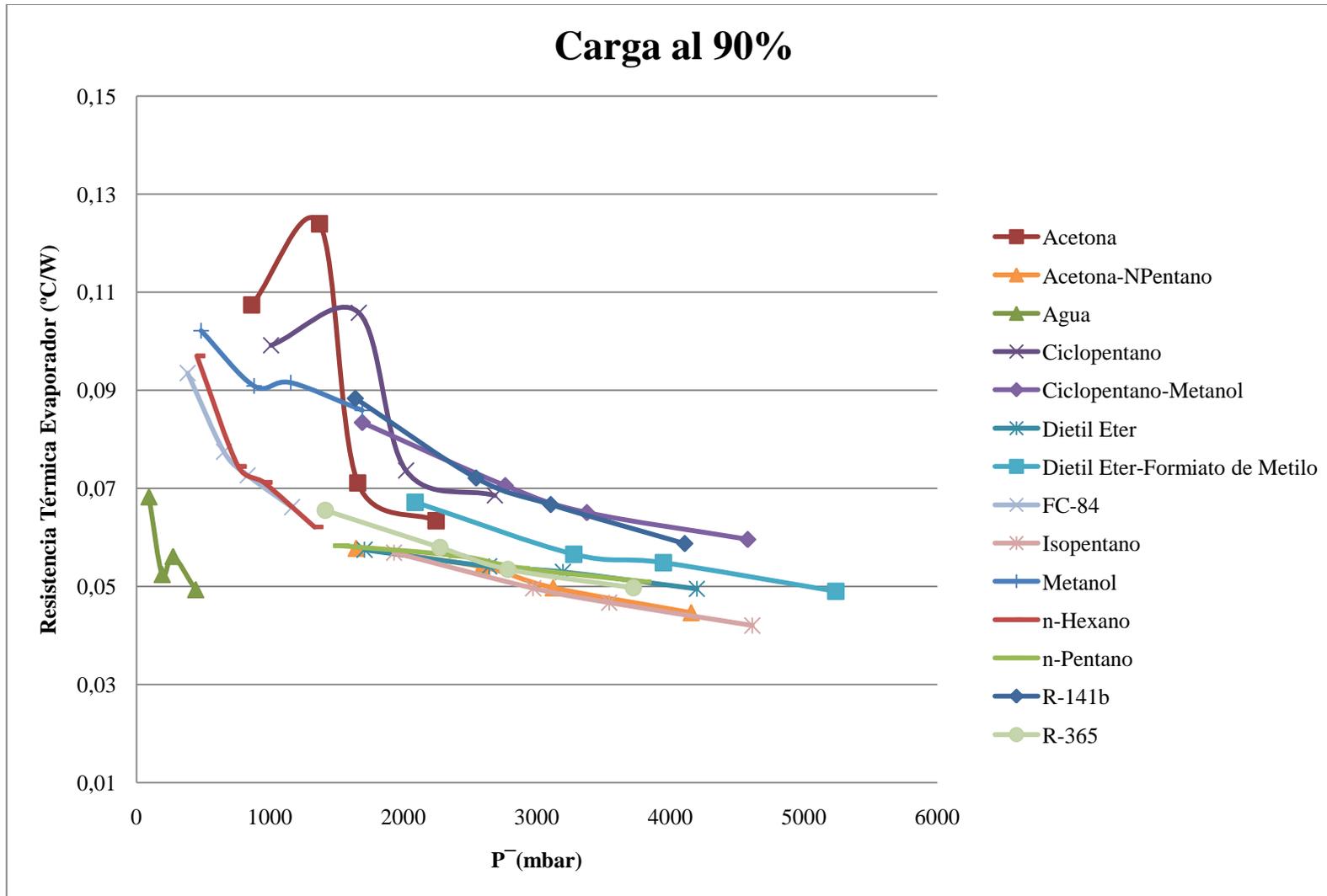


Gráfica 7.2-8 Variación de la isothermicidad con respecto a la presión del interior del termosifón y al fluido de trabajo con carga del 70%.

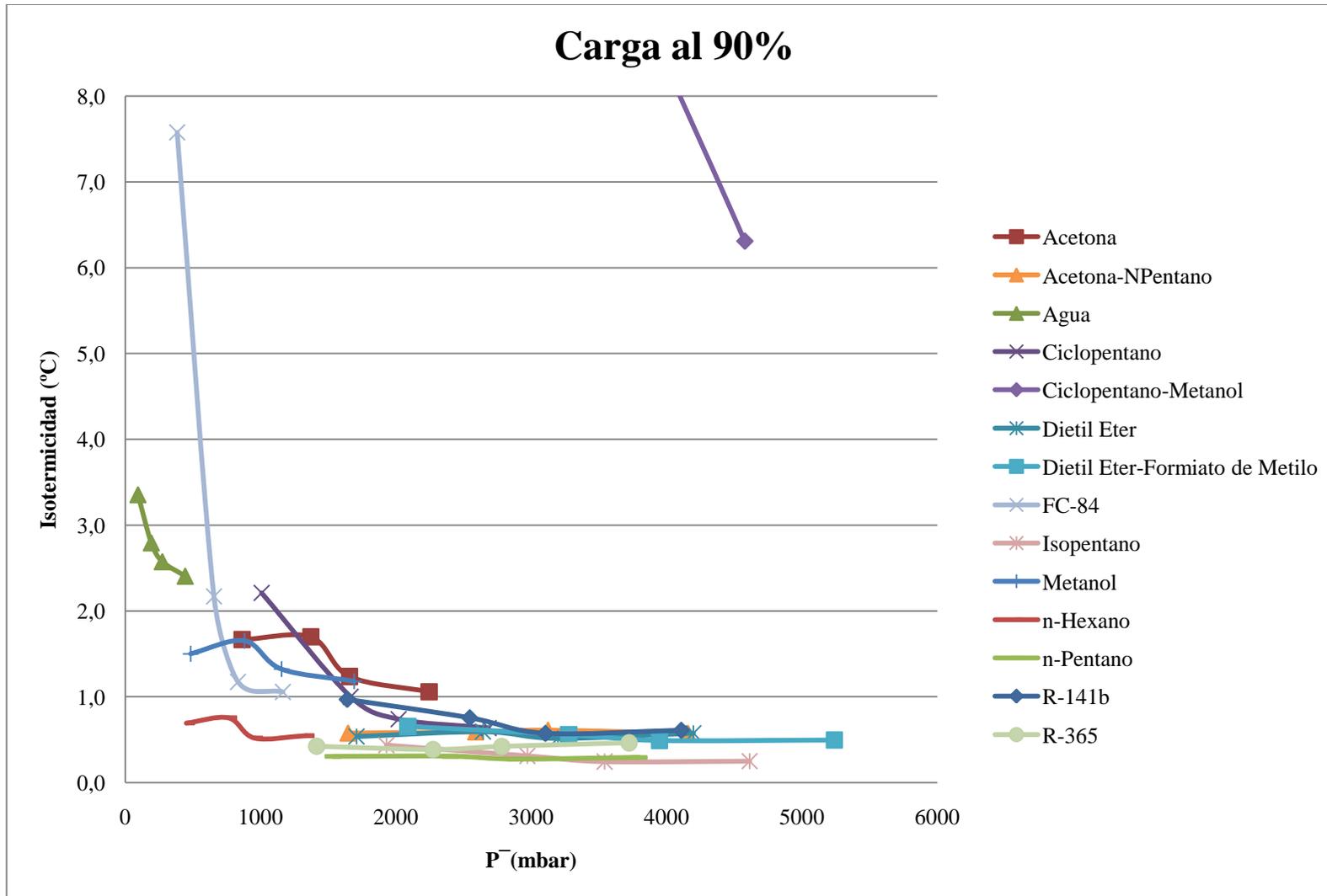
7.2.1.3 Bloque de ensayos al 90%



Gráfica 7.2-9 Variación de la resistencia térmica global con respecto a la presión del interior del termosifón y al fluido de trabajo con carga del 90%.



Gráfica 7.2-10 Variación de la resistencia térmica en el evaporador con respecto a la presión del interior del termosifón y al fluido de trabajo con carga del 90%.



Gráfica 7.2-12 Variación de la isothermicidad con respecto a la presión del interior del termosifón y al fluido de trabajo con carga del 90%.

7.3 CLASIFICACIÓN DE TODOS LOS ENSAYOS

A continuación se ordenan los resultados de los ensayos realizados con el termosifón cilíndrico según la resistencia térmica global (R_g). Se listan los resultados según la sustancia de trabajo utilizada, la carga con la que se hizo el ensayo, el flujo de calor empleado, la inclinación del termosifón y la temperatura ambiente en la que trabajaba el termosifón. En la última columna de la tabla que viene a continuación, se presenta al mejor resultado con el valor de 100, y al resto de resultados se les da el valor proporcional.

Sustancia	Carga	Flujo de calor (W)	Inclinación	\bar{T}_{amb} (°C)	R_g (°C/W)	Valor relativo (%)
Agua (rep.)	50%	150	Vertical	24,83	0,267	100,00
Agua (rep.)	50%	150	Vertical	31,77	0,268	100,12
Agua (rep.)	50%	150	Vertical	42,65	0,269	100,41
Agua (rep.)	70%	150	Vertical	42,43	0,278	104,05
Agua (rep.)	70%	150	Vertical	31,52	0,283	105,86
Acetona- NPentano	90%	150	Vertical	42,64	0,287	107,28
Agua (rep.)	70%	150	Vertical	24,65	0,287	107,30
Isopentano	90%	150	Vertical	42,61	0,289	107,92
R-365-mfc	50%	150	Vertical	42,96	0,293	109,61
R-141b	90%	150	60°	10,18	0,293	109,65
Acetona- NPentano	70%	150	Vertical	42,41	0,293	109,69
Acetona- NPentano	90%	150	Vertical	31,53	0,293	109,70
Isopentano	90%	150	Vertical	31,69	0,294	109,92
N-Hexano	90%	200	Vertical	42,63	0,295	110,29
R-141b	90%	200	Vertical	31,40	0,297	110,89
N-Hexano	90%	175	Vertical	42,66	0,297	110,94
R-141b	90%	200	Vertical	24,55	0,297	111,02
Acetona- NPentano	90%	150	Vertical	10,36	0,297	111,07
R-365-mfc	50%	150	Vertical	31,89	0,297	111,19
Isopentano	90%	150	Vertical	24,94	0,298	111,33
N-Hexano	90%	200	Vertical	31,77	0,298	111,37
Isopentano	70%	150	Vertical	42,73	0,298	111,47
N-Hexano	90%	175	Vertical	31,66	0,298	111,61
Acetona- NPentano	90%	150	Vertical	24,52	0,299	111,65
N-Hexano	90%	200	Vertical	24,91	0,299	111,74
Acetona- NPentano	50%	150	Vertical	42,49	0,299	111,83
R-141b	90%	175	Vertical	31,59	0,300	112,29
Acetona- NPentano	70%	150	Vertical	31,50	0,300	112,33

Tabla 7.3-1 Clasificación de los resultados de todos los ensayos con el termosifón cilíndrico.

Sustancia	Carga	Flujo de calor (W)	Inclinación	\bar{T}_{amb} (°C)	R_g (°C/W)	Valor relativo (%)
R-365-mfc	50%	150	Vertical	25,02	0,300	112,34
Agua (rep.)	90%	150	Vertical	42,55	0,301	112,38
R-141b	90%	200	Vertical	42,41	0,301	112,50
Isopentano	50%	150	Vertical	42,66	0,301	112,50
R-141b	90%	125	Vertical	42,12	0,301	112,52
Agua (rep.)	50%	150	Vertical	10,12	0,301	112,54
N-Hexano	90%	200	Vertical	10,35	0,301	112,54
Isopentano	90%	150	Vertical	10,31	0,301	112,55
R-141b	90%	200	Vertical	10,50	0,301	112,71
Dietil Éter-Formiato de Metilo	70%	150	Vertical	43,45	0,302	112,76
N-Hexano	90%	150	Vertical	42,75	0,302	112,76
R-141b	90%	175	Vertical	24,55	0,302	112,95
Acetona- NPentano	50%	150	Vertical	10,11	0,302	112,97
Acetona- NPentano	70%	150	Vertical	24,74	0,302	113,08
Isopentano	70%	150	Vertical	31,79	0,303	113,16
Agua (rep.)	90%	150	Vertical	31,49	0,303	113,18
Acetona- NPentano	50%	150	Vertical	31,44	0,303	113,20
N-Hexano	90%	175	Vertical	24,78	0,303	113,26
Isopentano	50%	150	Vertical	31,73	0,304	113,76
Dietil Éter-Formiato de Metilo	50%	150	Vertical	43,28	0,305	114,02
Acetona- NPentano	70%	150	Vertical	10,25	0,305	114,07
Agua	50%	150	Vertical	42,75	0,305	114,13
Dietil Éter-Formiato de Metilo	70%	150	Vertical	32,62	0,306	114,30
Dietil Éter-Formiato de Metilo	90%	150	Vertical	43,37	0,306	114,31
R-141b	90%	175	Vertical	42,29	0,306	114,40
R-141b	90%	150	Vertical	43,34	0,306	114,44
Agua	70%	150	Vertical	42,73	0,306	114,51
R-141b	90%	175	Vertical	10,40	0,307	114,67
R-365-mfc	70%	150	Vertical	42,68	0,307	114,87
Isopentano	70%	150	Vertical	24,92	0,308	115,01
Isopentano	50%	150	Vertical	24,80	0,308	115,03
Isopentano	70%	150	Vertical	10,44	0,308	115,07

Tabla 7.3-2 Clasificación de los resultados de todos los ensayos con el termosifón cilíndrico (continuación).

Sustancia	Carga	Flujo de calor (W)	Inclinación	\bar{T}_{amb} (°C)	R_g (°C/W)	Valor relativo (%)
Dietil Éter-Formiato de Metilo	50%	150	Vertical	32,61	0,308	115,08
Agua	90%	150	Vertical	42,69	0,308	115,09
R-141b	90%	150	80°	42,02	0,308	115,14
R-365-mfc	90%	150	Vertical	42,70	0,308	115,18
Agua	90%	150	Vertical	25,08	0,308	115,27
Dietil Éter-Formiato de Metilo	50%	150	Vertical	25,73	0,309	115,57
Dietil Éter-Formiato de Metilo	70%	150	Vertical	25,83	0,309	115,59
Agua (rep.)	90%	150	Vertical	24,48	0,309	115,60
N-Hexano	90%	175	Vertical	10,39	0,310	116,01
N-Pentano	70%	150	Vertical	42,60	0,310	116,08
R-141b	90%	150	60°	24,44	0,310	116,10
N-Hexano	90%	150	Vertical	31,84	0,311	116,15
Dietil Éter	50%	150	Vertical	42,69	0,311	116,26
Isopentano	50%	150	Vertical	10,46	0,311	116,31
Dietil Éter	90%	150	Vertical	42,68	0,311	116,43
R-141b	90%	150	60°	31,27	0,311	116,44
R-141b	90%	150	80°	24,35	0,311	116,45
R-141b	90%	150	80°	31,23	0,312	116,55
Dietil Éter-Formiato de Metilo	90%	150	Vertical	32,59	0,312	116,61
N-Pentano	90%	150	Vertical	42,47	0,312	116,61
Acetona-NPentano	50%	150	Vertical	24,59	0,312	116,74
R-365-mfc	70%	150	Vertical	31,83	0,313	116,85
R-141b	90%	150	Vertical	32,69	0,313	117,14
N-Hexano	90%	150	80°	42,10	0,314	117,27
R-141b	90%	150	80°	10,35	0,314	117,28
Agua	70%	150	Vertical	31,85	0,314	117,47
Formiato de Metilo	70%	150	Vertical	24,76	0,314	117,53
Dietil Éter-Formiato de Metilo	90%	150	Vertical	25,81	0,314	117,58
R-365-mfc	90%	150	Vertical	31,75	0,315	117,63
N-Pentano	70%	150	Vertical	31,67	0,315	117,64
Agua	90%	150	Vertical	31,76	0,315	117,64

Tabla 7.3-3 Clasificación de los resultados de todos los ensayos con el termosifón cilíndrico (continuación).

Sustancia	Carga	Flujo de calor (W)	Inclinación	\bar{T}_{amb} (°C)	R_g (°C/W)	Valor relativo (%)
N-Hexano	90%	150	Vertical	24,91	0,315	117,71
Dietil Éter	70%	150	Vertical	42,44	0,315	117,84
R-141b	70%	150	Vertical	43,42	0,315	117,96
N-Pentano	50%	150	Vertical	42,79	0,315	117,97
N-Pentano	90%	150	Vertical	31,51	0,316	118,23
Dietil Éter	90%	150	Vertical	32,00	0,316	118,33
Formiato de Metilo	50%	150	Vertical	24,98	0,317	118,46
N-Pentano	70%	150	Vertical	10,37	0,317	118,54
N-Pentano	90%	150	Vertical	10,23	0,317	118,55
Dietil Éter-Formiato de Metilo	70%	150	Vertical	11,31	0,317	118,63
N-Pentano	70%	150	Vertical	24,90	0,317	118,65
Formiato de Metilo	50%	150	Vertical	31,93	0,317	118,65
Dietil Éter	50%	150	Vertical	31,72	0,317	118,68
Dietil Éter	90%	150	Vertical	25,01	0,318	118,91
R-365-mfc	50%	150	Vertical	10,35	0,318	118,92
R-141b	90%	150	Vertical	25,71	0,318	119,02
N-Pentano	50%	150	Vertical	10,40	0,319	119,31
Dietil Éter	70%	150	Vertical	31,70	0,319	119,32
Acetona	70%	150	Vertical	43,39	0,319	119,33
R-141b	90%	100	Vertical	41,90	0,319	119,36
R-141b	90%	125	Vertical	31,40	0,319	119,45
R-141b	90%	150	60°	42,30	0,320	119,47
N-Pentano	90%	150	Vertical	24,73	0,320	119,48
R-365-mfc	70%	150	Vertical	25,04	0,320	119,50
N-Pentano	50%	150	Vertical	31,80	0,320	119,60
R-365-mfc	90%	150	Vertical	24,72	0,320	119,63
Agua	50%	150	Vertical	31,81	0,320	119,69
Agua (rep.)	70%	150	Vertical	10,05	0,321	120,03
Ciclopentano-Metanol	70%	150	Vertical	43,08	0,322	120,35
Dietil Éter	90%	150	Vertical	10,41	0,322	120,36
Dietil Éter	50%	150	Vertical	24,90	0,322	120,39
Dietil Éter	70%	150	Vertical	24,82	0,322	120,41
Agua	70%	150	Vertical	24,87	0,322	120,46
Dietil Éter-Formiato de Metilo	50%	150	Vertical	11,37	0,322	120,57

Tabla 7.3-4 Clasificación de los resultados de todos los ensayos con el termosifón cilíndrico (continuación).

Sustancia	Carga	Flujo de calor (W)	Inclinación	\bar{T}_{amb} (°C)	R_g (°C/W)	Valor relativo (%)
Dietil Éter-Formiato de Metilo	90%	150	Vertical	11,34	0,322	120,58
N-Hexano	90%	150	60°	42,28	0,323	120,77
Dietil Éter	70%	150	Vertical	10,41	0,323	120,79
R-141b	50%	150	Vertical	43,13	0,323	120,91
N-Pentano	50%	150	Vertical	25,00	0,324	121,05
R-365-mfc	70%	150	Vertical	10,23	0,324	121,12
N-Hexano	90%	150	80°	31,38	0,324	121,18
Acetona	90%	150	Vertical	43,18	0,325	121,36
R-141b	70%	150	Vertical	32,69	0,325	121,40
R-365-mfc	90%	150	Vertical	10,32	0,325	121,41
N-Hexano	90%	150	60°	24,62	0,325	121,44
Formiato de Metilo	70%	150	Vertical	31,57	0,325	121,50
N-Hexano	90%	150	60°	31,49	0,325	121,52
Agua	50%	150	Vertical	24,96	0,326	121,77
N-Hexano	90%	150	80°	10,27	0,327	122,23
R-141b	90%	125	Vertical	24,50	0,328	122,65
Ciclopentano-Metanol	70%	150	Vertical	32,45	0,329	122,87
R-141b	50%	150	Vertical	32,43	0,329	123,03
Ciclopentano-Metanol	50%	150	Vertical	43,24	0,329	123,18
R-141b	70%	150	Vertical	25,76	0,329	123,20
Metanol	90%	150	Vertical	43,30	0,330	123,23
Acetona	50%	150	Vertical	43,36	0,330	123,49
FC-84	70%	150	Vertical	42,83	0,332	124,00
Ciclopentano-Metanol	70%	150	Vertical	25,71	0,332	124,02
Dietil Éter	50%	150	Vertical	10,47	0,332	124,12
Ciclopentano-Metanol	50%	150	Vertical	32,39	0,332	124,18
FC-84	50%	150	Vertical	42,84	0,332	124,26
Acetona	70%	150	Vertical	32,73	0,332	124,32
Ciclopentano	50%	150	Vertical	42,80	0,333	124,34
R-141b	90%	150	Vertical	11,26	0,333	124,51
N-Hexano	90%	125	Vertical	42,32	0,333	124,61
N-Hexano	90%	150	80°	24,56	0,333	124,62
R-141b	50%	150	Vertical	25,79	0,334	124,88
Agua (rep.)	90%	150	Vertical	10,24	0,334	124,96
Ciclopentano-Metanol	50%	150	Vertical	25,51	0,335	125,15

Tabla 7.3-5 Clasificación de los resultados de todos los ensayos con el termosifón cilíndrico (continuación).

Sustancia	Carga	Flujo de calor (W)	Inclinación	\bar{T}_{amb} (°C)	R_g (°C/W)	Valor relativo (%)
Acetona	50%	150	Vertical	11,40	0,335	125,29
Acetona	70%	150	Vertical	11,40	0,335	125,30
Agua	50%	150	Vertical	10,51	0,335	125,32
Acetona	90%	150	Vertical	32,39	0,336	125,54
Acetona	50%	150	Vertical	25,78	0,337	125,84
Acetona	50%	150	Vertical	32,69	0,337	125,92
N-Hexano	90%	150	Vertical	10,49	0,337	126,15
Metanol	90%	150	Vertical	32,66	0,338	126,39
N-Hexano	70%	150	Vertical	42,80	0,338	126,43
Ciclopentano	50%	150	Vertical	32,13	0,339	126,59
Metanol	50%	150	Vertical	25,72	0,339	126,64
Metanol	50%	150	Vertical	32,61	0,339	126,74
Ciclopentano	90%	150	Vertical	42,69	0,339	126,80
Metanol	90%	150	Vertical	25,78	0,339	126,92
Metanol	50%	150	Vertical	11,28	0,340	127,04
R-141b	90%	100	Vertical	31,37	0,340	127,16
Metanol	50%	150	Vertical	43,44	0,341	127,37
Ciclopentano	50%	150	Vertical	25,05	0,341	127,47
Agua	90%	150	Vertical	10,56	0,342	127,89
Ciclopentano	70%	150	Vertical	42,61	0,343	128,17
Ciclopentano	50%	150	Vertical	10,41	0,343	128,23
Ciclopentano-Metanol	50%	150	Vertical	11,24	0,343	128,38
FC-84	70%	150	Vertical	31,77	0,344	128,76
FC-84	50%	150	Vertical	31,89	0,345	128,86
Ciclopentano	90%	150	Vertical	32,00	0,346	129,38
R-141b	90%	125	Vertical	10,27	0,347	129,73
N-Hexano	50%	150	Vertical	42,52	0,349	130,36
Ciclopentano-Metanol	90%	150	Vertical	43,28	0,349	130,49
FC-84	50%	150	Vertical	24,95	0,350	130,70
R-141b	50%	150	Vertical	11,51	0,350	130,73
FC-84	70%	150	Vertical	24,83	0,350	130,90
Metanol	90%	150	Vertical	11,35	0,353	131,92
FC-84	90%	150	Vertical	42,79	0,353	132,01
N-Hexano	50%	150	Vertical	31,56	0,353	132,07
Metanol	70%	150	Vertical	43,17	0,357	133,40
Ciclopentano-Metanol	70%	150	Vertical	11,22	0,357	133,45
R-141b	70%	150	Vertical	11,29	0,357	133,55

Tabla 7.3-6 Clasificación de los resultados de todos los ensayos con el termosifón cilíndrico (continuación).

Sustancia	Carga	Flujo de calor (W)	Inclinación	\bar{T}_{amb} (°C)	R_g (°C/W)	Valor relativo (%)
N-Hexano	50%	150	Vertical	24,68	0,357	133,55
Acetona	70%	150	Vertical	25,89	0,358	133,90
Ciclopentano-Metanol	90%	150	Vertical	32,36	0,358	133,92
N-Hexano	50%	150	Vertical	10,54	0,359	134,05
FC-84	50%	150	Vertical	10,44	0,361	134,86
FC-84	90%	150	Vertical	31,81	0,362	135,52
Metanol	70%	150	Vertical	32,61	0,363	135,83
N-Hexano	70%	150	Vertical	31,83	0,364	136,04
N-Hexano	90%	125	Vertical	10,30	0,365	136,48
Ciclopentano	70%	150	Vertical	31,84	0,365	136,58
Ciclopentano	90%	150	Vertical	10,36	0,366	136,71
Ciclopentano-Metanol	90%	150	Vertical	25,67	0,366	136,74
FC-84	70%	150	Vertical	10,42	0,366	136,90
Metanol	70%	150	Vertical	11,19	0,369	137,79
FC-84	90%	150	Vertical	24,72	0,369	137,93
Ciclopentano	70%	150	Vertical	10,23	0,369	138,09
Metanol	70%	150	Vertical	25,70	0,370	138,34
N-Hexano	70%	150	Vertical	24,99	0,372	139,17
R-141b	90%	100	Vertical	10,18	0,374	139,83
Ciclopentano	70%	150	Vertical	24,93	0,375	140,27
Ciclopentano-Metanol	90%	150	Vertical	11,10	0,376	140,46
Ciclopentano	90%	150	Vertical	24,92	0,382	142,66
Acetona	90%	150	Vertical	11,39	0,382	142,66
FC-84	90%	150	Vertical	10,54	0,383	143,17
N-Hexano	90%	125	Vertical	31,72	0,387	144,64
R-141b	90%	75	Vertical	41,92	0,390	145,79
N-Hexano	90%	100	Vertical	42,16	0,391	146,25
R-141b	90%	75	Vertical	24,48	0,392	146,55
R-141b	90%	75	Vertical	31,19	0,393	146,77
Acetona	90%	150	Vertical	25,87	0,393	146,94
R-141b	90%	75	Vertical	10,24	0,396	148,21
N-Hexano	70%	150	Vertical	10,75	0,400	149,48
R-141b	90%	100	Vertical	24,57	0,400	149,55
N-Hexano	90%	125	Vertical	24,78	0,406	151,87
N-Hexano	90%	100	Vertical	24,90	0,411	153,51
N-Hexano	90%	100	Vertical	10,29	0,412	153,88
N-Hexano	90%	100	Vertical	31,76	0,414	154,65

Tabla 7.3-7 Clasificación de los resultados de todos los ensayos con el termosifón cilíndrico (continuación).

Sustancia	Carga	Flujo de calor (W)	Inclinación	\bar{T}_{amb} (°C)	R_g (°C/W)	Valor relativo (%)
N-Hexano	90%	75	Vertical	10,30	0,431	161,30
N-Hexano	90%	75	Vertical	24,91	0,436	163,15
N-Hexano	90%	75	Vertical	42,35	0,437	163,46
N-Hexano	90%	75	Vertical	31,71	0,439	164,19

Tabla 7.3-8 Clasificación de los resultados de todos los ensayos con el termosifón cilíndrico (continuación).

7.3.1 Clasificación de los ensayos a diferentes flujos de calor

Se va a realizar lo mismo que en la tabla anterior pero fijándose sólo en los ensayos realizados con diferentes flujos de calor (también aparecen en la clasificación de todos los ensayos).

Sustancia	Carga	Flujo de calor (W)	Inclinación	\bar{T}_{amb} (°C)	R_g (°C/W)	Valor relativo (%)
N-Hexano	90%	200	Vertical	42,63	0,295	100,00
R-141b	90%	200	Vertical	31,40	0,297	100,55
N-Hexano	90%	175	Vertical	42,66	0,297	100,59
R-141b	90%	200	Vertical	24,55	0,297	100,66
N-Hexano	90%	200	Vertical	31,77	0,298	100,98
N-Hexano	90%	175	Vertical	31,66	0,298	101,19
N-Hexano	90%	200	Vertical	24,91	0,299	101,32
R-141b	90%	175	Vertical	31,59	0,300	101,81
R-141b	90%	200	Vertical	42,41	0,301	102,00
R-141b	90%	125	Vertical	42,12	0,301	102,02
N-Hexano	90%	200	Vertical	10,35	0,301	102,04
R-141b	90%	200	Vertical	10,50	0,301	102,19
N-Hexano	90%	150	Vertical	42,75	0,302	102,24
R-141b	90%	175	Vertical	24,55	0,302	102,41
N-Hexano	90%	175	Vertical	24,78	0,303	102,69
R-141b	90%	175	Vertical	42,29	0,306	103,72
R-141b	90%	150	Vertical	43,34	0,306	103,76
R-141b	90%	175	Vertical	10,40	0,307	103,97
N-Hexano	90%	175	Vertical	10,39	0,310	105,18
N-Hexano	90%	150	Vertical	31,84	0,311	105,31
R-141b	90%	150	Vertical	32,69	0,313	106,21
N-Hexano	90%	150	Vertical	24,91	0,315	106,72
R-141b	90%	150	Vertical	25,71	0,318	107,91
R-141b	90%	100	Vertical	41,90	0,319	108,22
R-141b	90%	125	Vertical	31,40	0,319	108,30
R-141b	90%	125	Vertical	24,50	0,328	111,20

Tabla 7.3-9 Clasificación de los resultados de los ensayos con diferentes flujos de calor.

Sustancia	Carga	Flujo de calor (W)	Inclinación	\bar{T}_{amb} (°C)	R_g (°C/W)	Valor relativo (%)
R-141b	90%	150	Vertical	11,26	0,333	112,89
N-Hexano	90%	125	Vertical	42,32	0,333	112,98
N-Hexano	90%	150	Vertical	10,49	0,337	114,38
R-141b	90%	100	Vertical	31,37	0,340	115,30
R-141b	90%	125	Vertical	10,27	0,347	117,62
N-Hexano	90%	125	Vertical	10,30	0,365	123,75
R-141b	90%	100	Vertical	10,18	0,374	126,78
N-Hexano	90%	125	Vertical	31,72	0,387	131,14
R-141b	90%	75	Vertical	41,92	0,390	132,19
N-Hexano	90%	100	Vertical	42,16	0,391	132,60
R-141b	90%	75	Vertical	24,48	0,392	132,87
R-141b	90%	75	Vertical	31,19	0,393	133,07
R-141b	90%	75	Vertical	10,24	0,396	134,38
R-141b	90%	100	Vertical	24,57	0,400	135,60
N-Hexano	90%	125	Vertical	24,78	0,406	137,70
N-Hexano	90%	100	Vertical	24,90	0,411	139,19
N-Hexano	90%	100	Vertical	10,29	0,412	139,52
N-Hexano	90%	100	Vertical	31,76	0,414	140,22
N-Hexano	90%	75	Vertical	10,30	0,431	146,25
N-Hexano	90%	75	Vertical	24,91	0,436	147,92
N-Hexano	90%	75	Vertical	42,35	0,437	148,20
N-Hexano	90%	75	Vertical	31,71	0,439	148,87

Tabla 7.3-10 Clasificación de los resultados de los ensayos con diferentes flujos de calor (continuación).

7.3.2 Clasificación de los ensayos con diferentes inclinaciones

Se van a ordenar los resultados de los ensayos realizados variando la inclinación del termosifón (también aparecen en la clasificación de todos los ensayos).

Sustancia	Carga	Flujo de calor (W)	Inclinación	\bar{T}_{amb} (°C)	R_g (°C/W)	Valor relativo (%)
R-141b	90%	150	60°	10,18	0,293	100,00
N-Hexano	90%	150	Vertical	42,75	0,302	102,84
R-141b	90%	150	Vertical	43,34	0,306	104,37
R-141b	90%	150	80°	42,02	0,308	105,01
R-141b	90%	150	60°	24,44	0,310	105,88
N-Hexano	90%	150	Vertical	31,84	0,311	105,93
R-141b	90%	150	60°	31,27	0,311	106,20
R-141b	90%	150	80°	24,35	0,311	106,20
R-141b	90%	150	80°	31,23	0,312	106,29

Tabla 7.3-11 Clasificación de los resultados de los ensayos con diferentes inclinaciones.

Sustancia	Carga	Flujo de calor (W)	Inclinación	\bar{T}_{amb} (°C)	R_g (°C/W)	Valor relativo (%)
R-141b	90%	150	Vertical	32,69	0,313	106,83
N-Hexano	90%	150	80°	42,10	0,314	106,95
R-141b	90%	150	80°	10,35	0,314	106,96
N-Hexano	90%	150	Vertical	24,91	0,315	107,35
R-141b	90%	150	Vertical	25,71	0,318	108,55
R-141b	90%	150	60°	42,30	0,320	108,96
N-Hexano	90%	150	60°	42,28	0,323	110,14
N-Hexano	90%	150	80°	31,38	0,324	110,52
N-Hexano	90%	150	60°	24,62	0,325	110,76
N-Hexano	90%	150	60°	31,49	0,325	110,83
N-Hexano	90%	150	80°	10,27	0,327	111,48
R-141b	90%	150	Vertical	11,26	0,333	113,55
N-Hexano	90%	150	80°	24,56	0,333	113,66
N-Hexano	90%	150	Vertical	10,49	0,337	115,05

Tabla 7.3-12 Clasificación de los resultados de los ensayos con diferentes inclinaciones (continuación).

7.4 COMPORTAMIENTO DEL TERMOSIFÓN SEGÚN ALGUNAS PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS DE TRABAJO

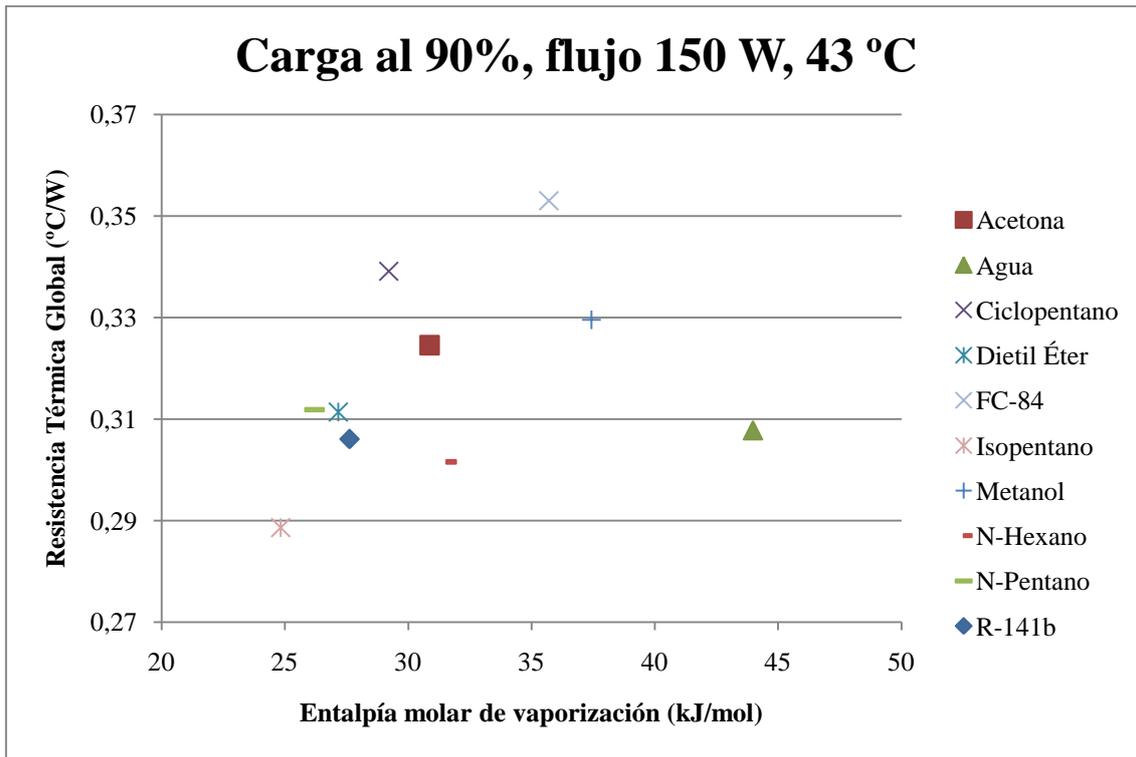
En el presente apartado se van a tener en cuenta varias propiedades de los fluidos de trabajo ensayados, y se va a analizar la influencia que tienen en el comportamiento del termosifón. Estas propiedades son:

- Entalpía molar de vaporización a 25 °C.
- Entalpía másica de vaporización a 25 °C.
- Densidad del líquido a 20 °C.
- Calor específico del líquido a 25 °C.
- Masa molecular.

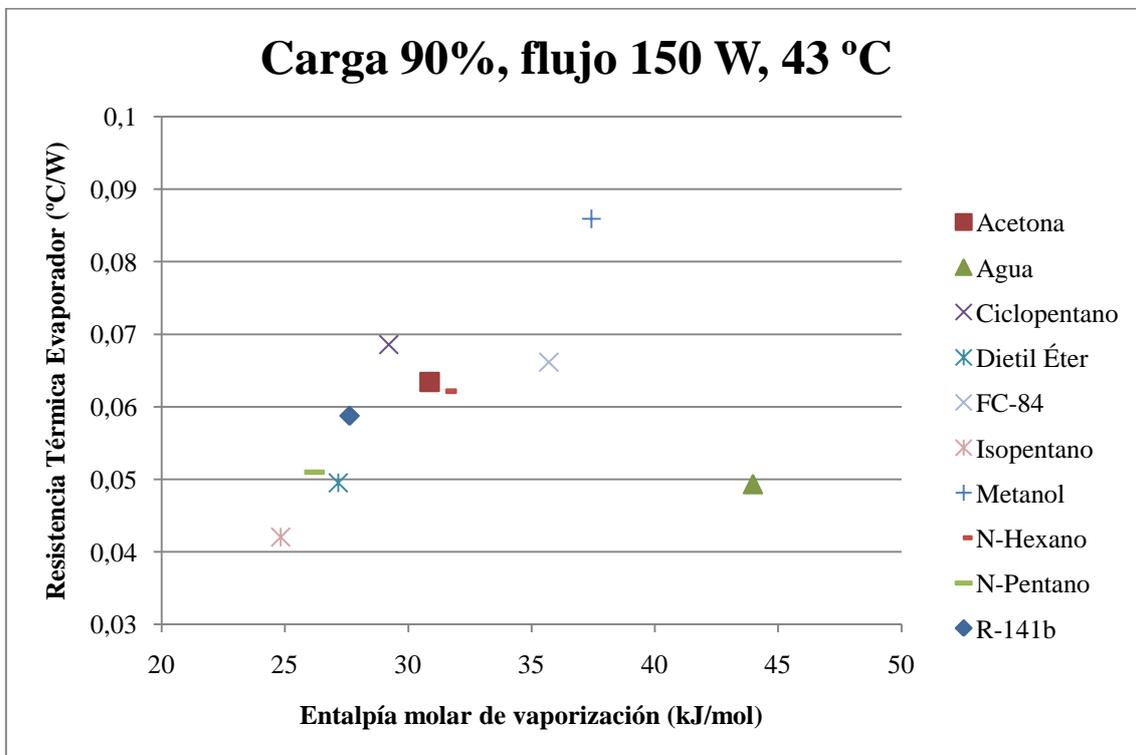
El valor de estas propiedades para cada fluido se puede ver en la tabla 3.3-2 del capítulo 3.

Con este objeto se van a comparar los resultados de los ensayos en las condiciones más estables del termosifón: carga del 90%, 150 W, 43 °C de la cámara climática y el termosifón en posición vertical. Se pueden ver los resultados numéricos en la sección 6.3 del capítulo 6.

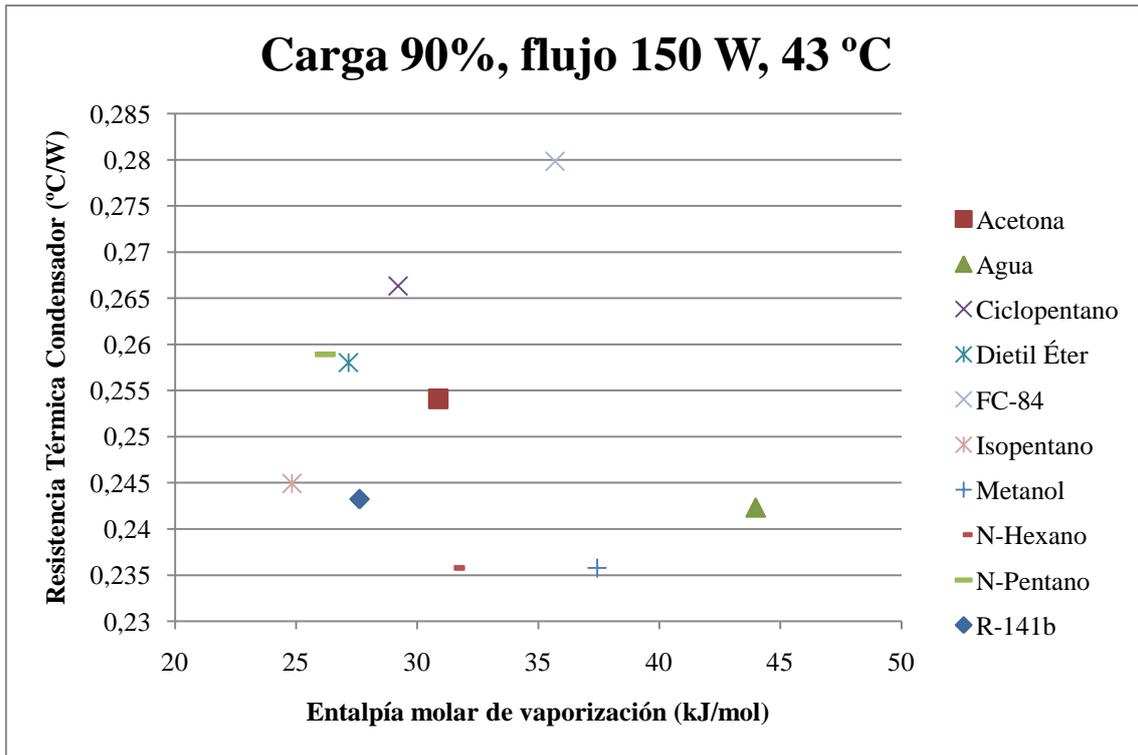
7.4.1 Entalpía molar de vaporización



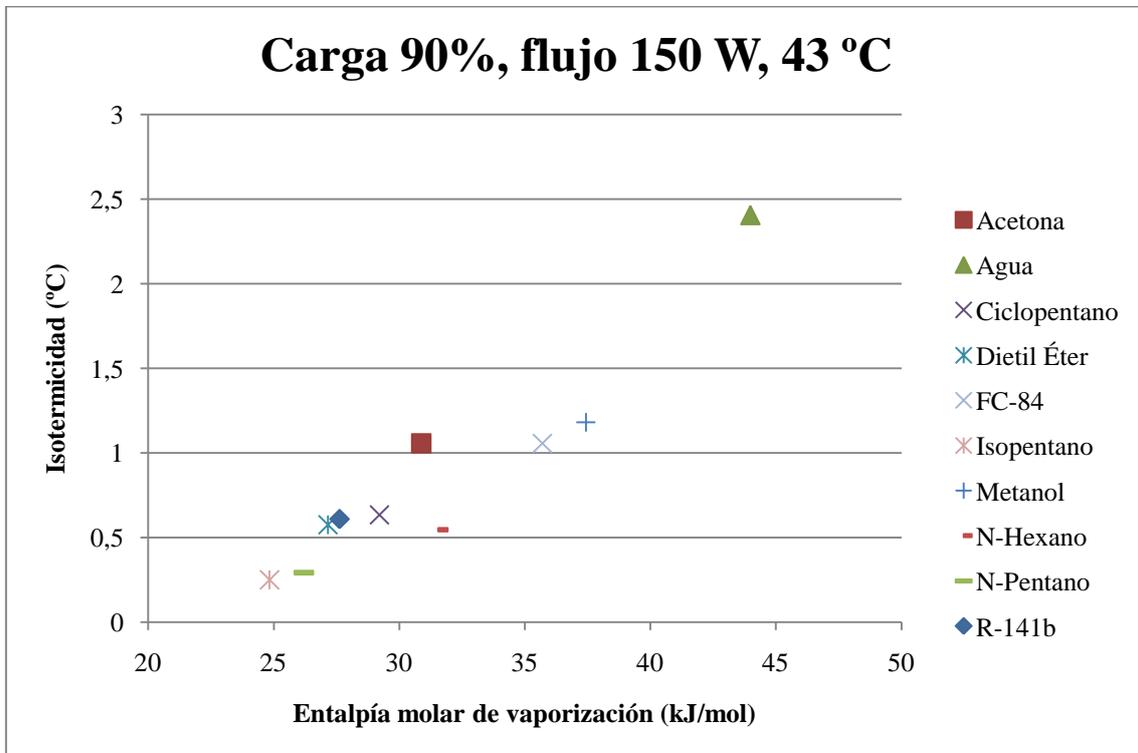
Gráfica 7.4-1 Variación de la resistencia térmica global con respecto a la entalpía molar de vaporización.



Gráfica 7.4-2 Variación de la resistencia térmica en el evaporador con respecto a la entalpía molar de vaporización.

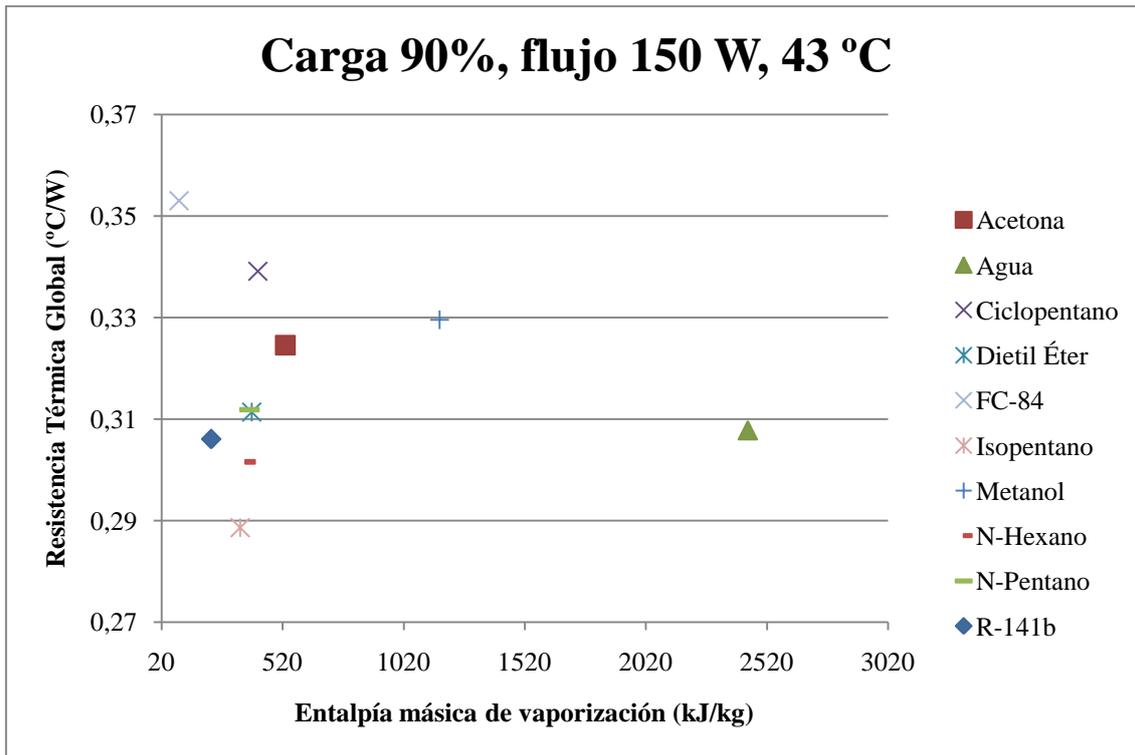


Gráfica 7.4-3 Variación de la resistencia térmica en el condensador con respecto a la entalpía molar de vaporización.

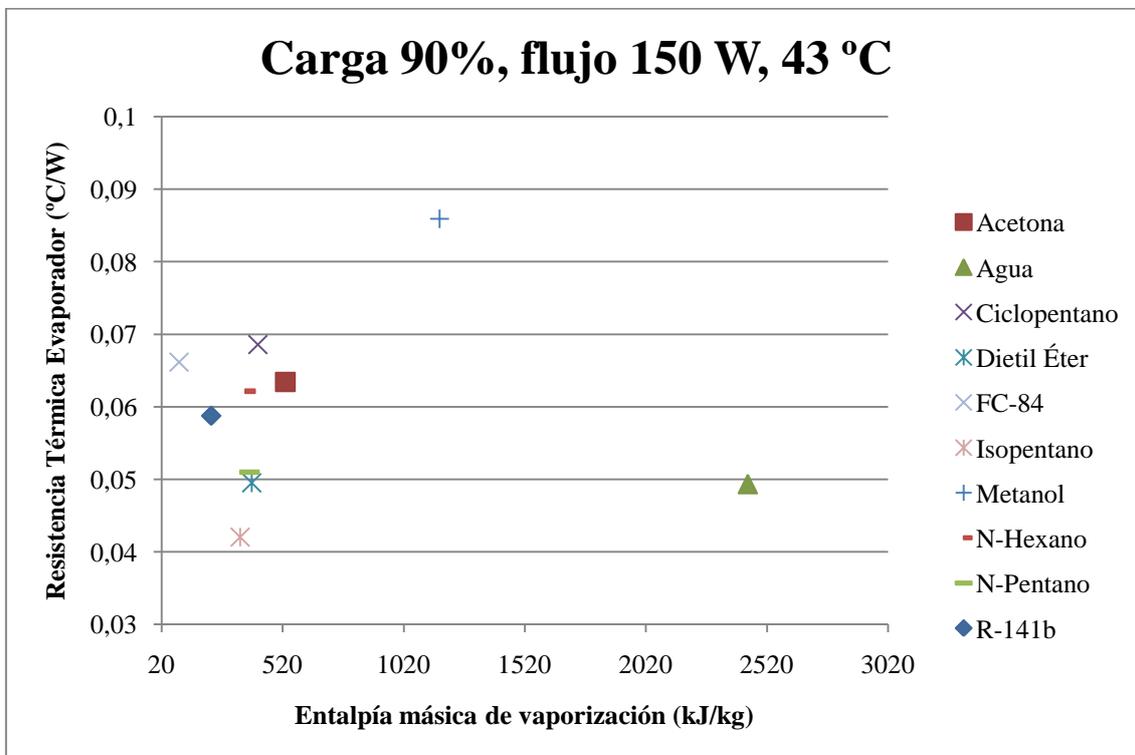


Gráfica 7.4-4 Variación de la isothermicidad con respecto a la entalpía molar de vaporización.

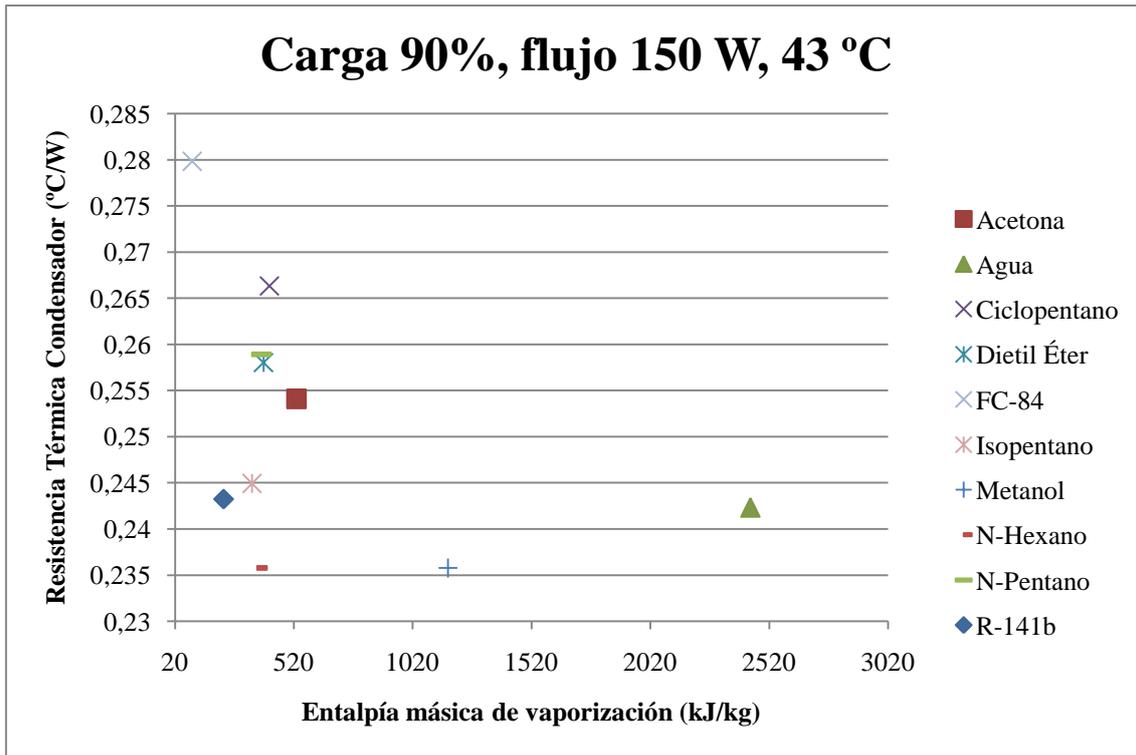
7.4.2 Entalpía másica de vaporización



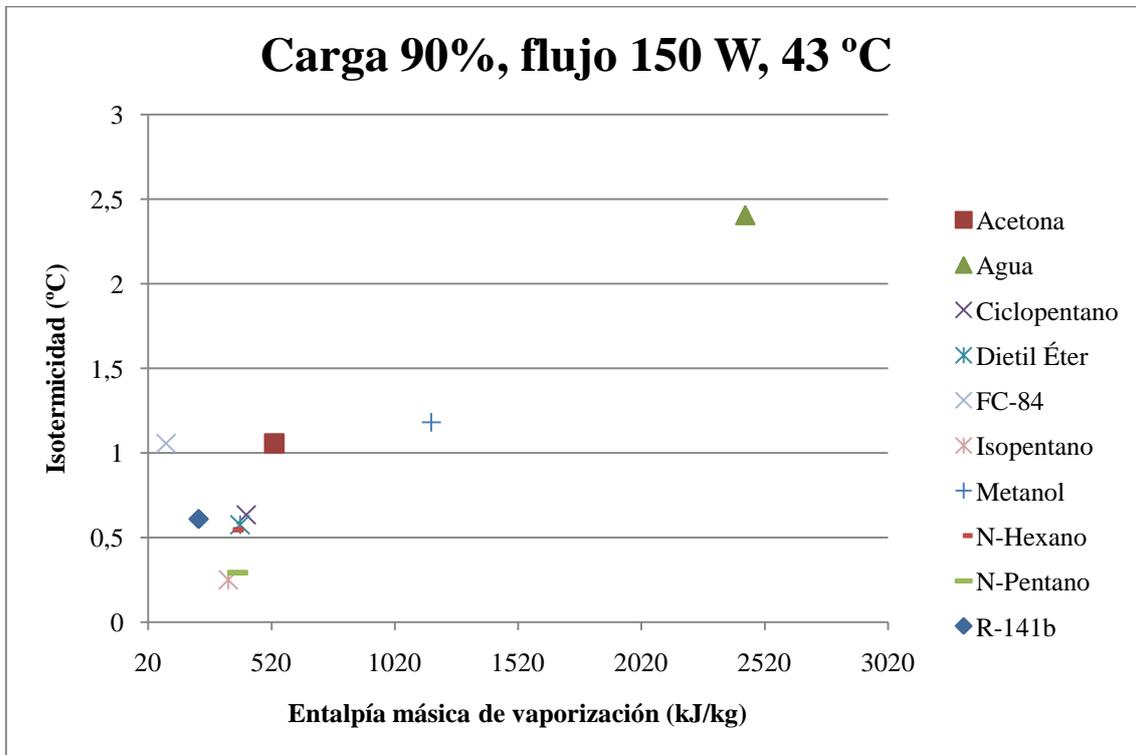
Gráfica 7.4-5 Variación de la resistencia térmica global con respecto a la entalpía másica de vaporización.



Gráfica 7.4-6 Variación de la resistencia térmica en el evaporador con respecto a la entalpía másica de vaporización.

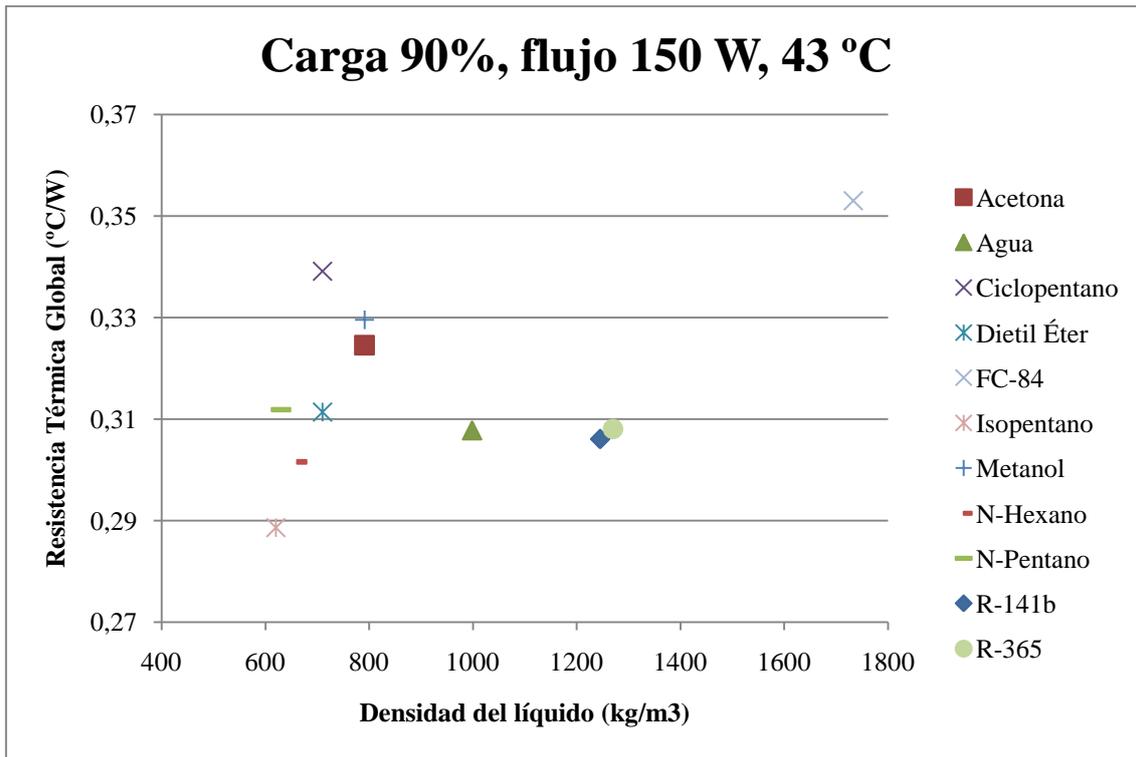


Gráfica 7.4-7 Variación de la resistencia térmica en el condensador con respecto a la entalpía másica de vaporización.

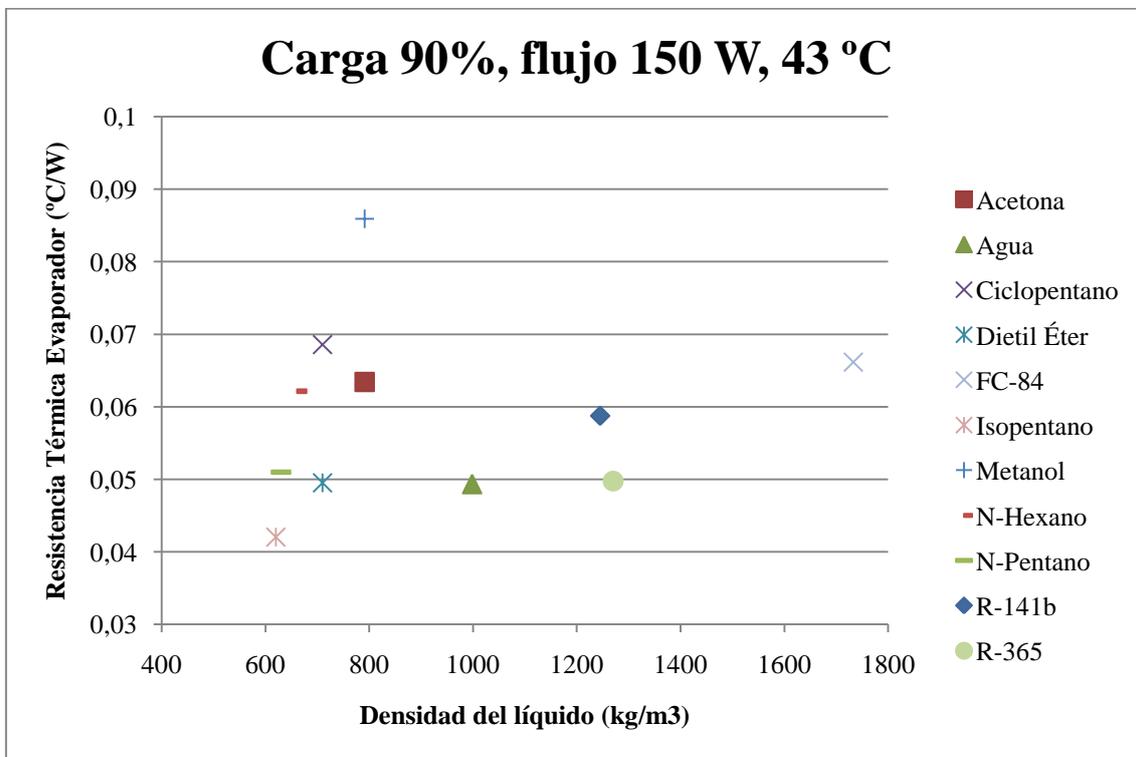


Gráfica 7.4-8 Variación de la isotermicidad con respecto a la entalpía másica de vaporización.

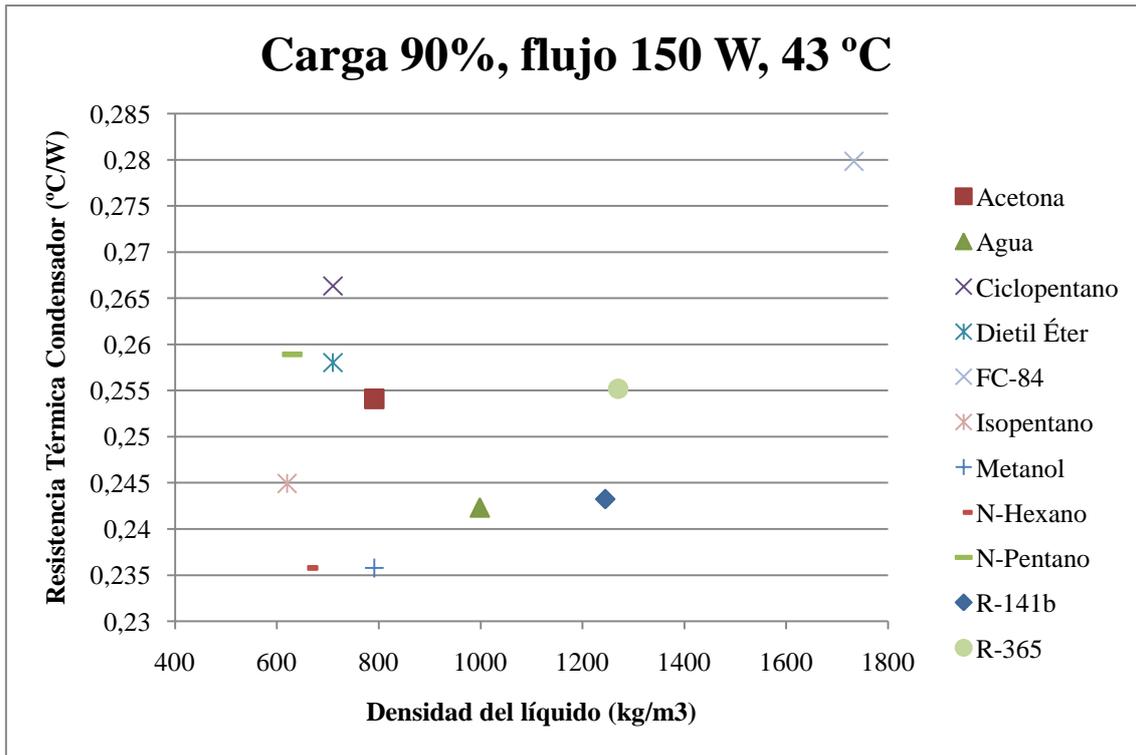
7.4.3 Densidad del líquido



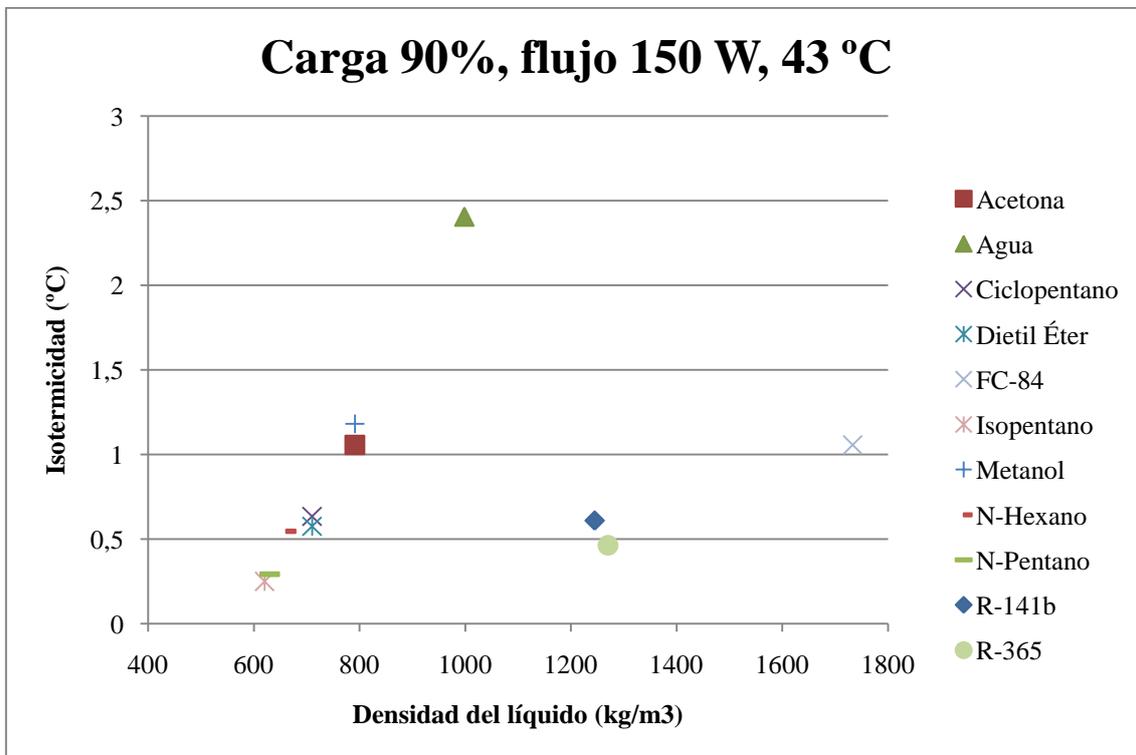
Gráfica 7.4-9 Variación de la resistencia térmica global con respecto a la densidad del líquido.



Gráfica 7.4-10 Variación de la resistencia térmica en el evaporador con respecto a la densidad del líquido.

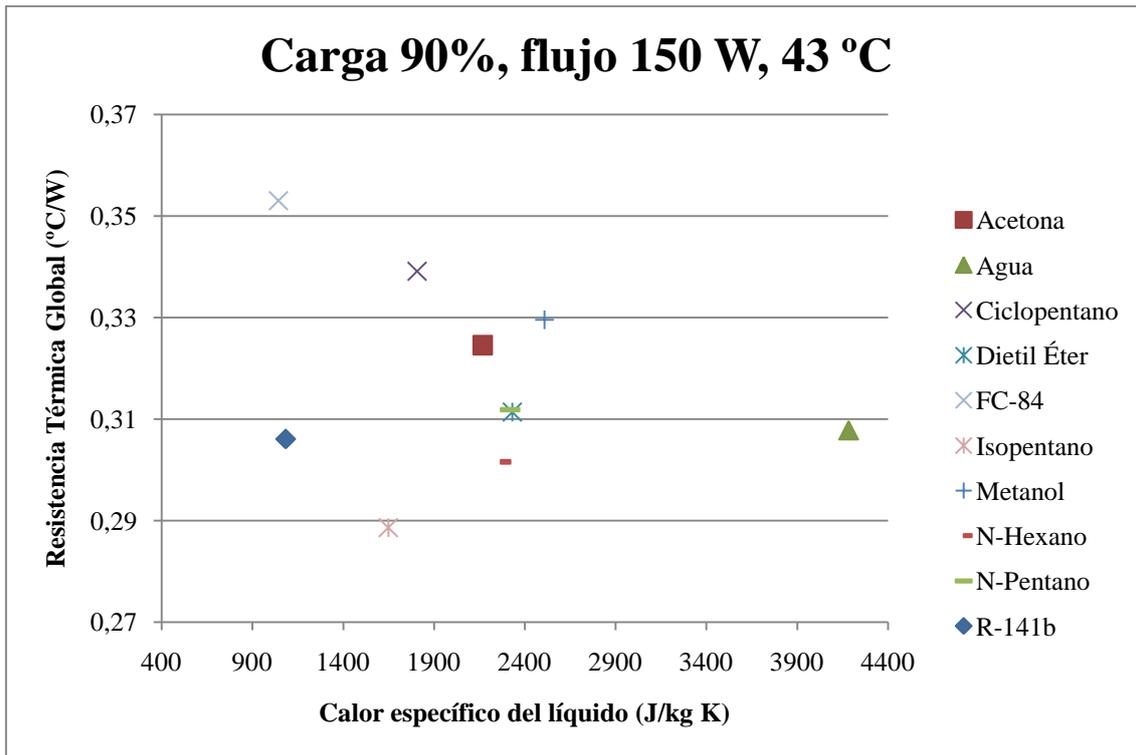


Gráfica 7.4-11 Variación de la resistencia térmica en el condensador con respecto a la densidad del líquido.

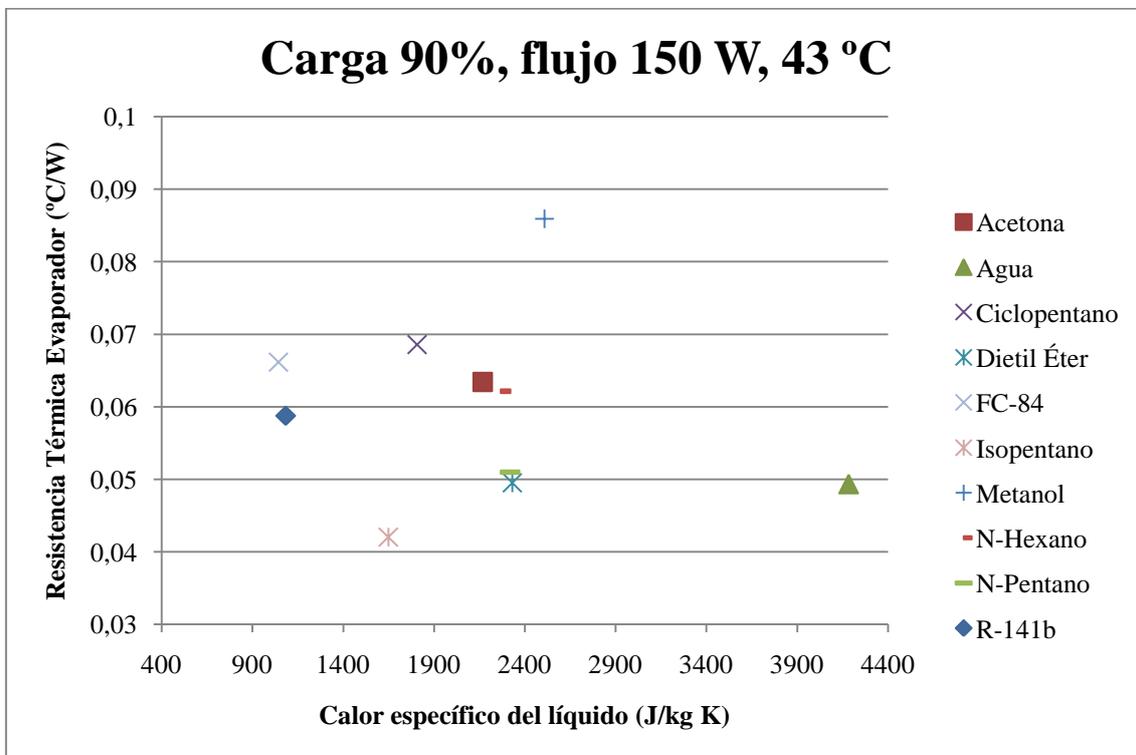


Gráfica 7.4-12 Variación de la isotermicidad con respecto a la densidad del líquido.

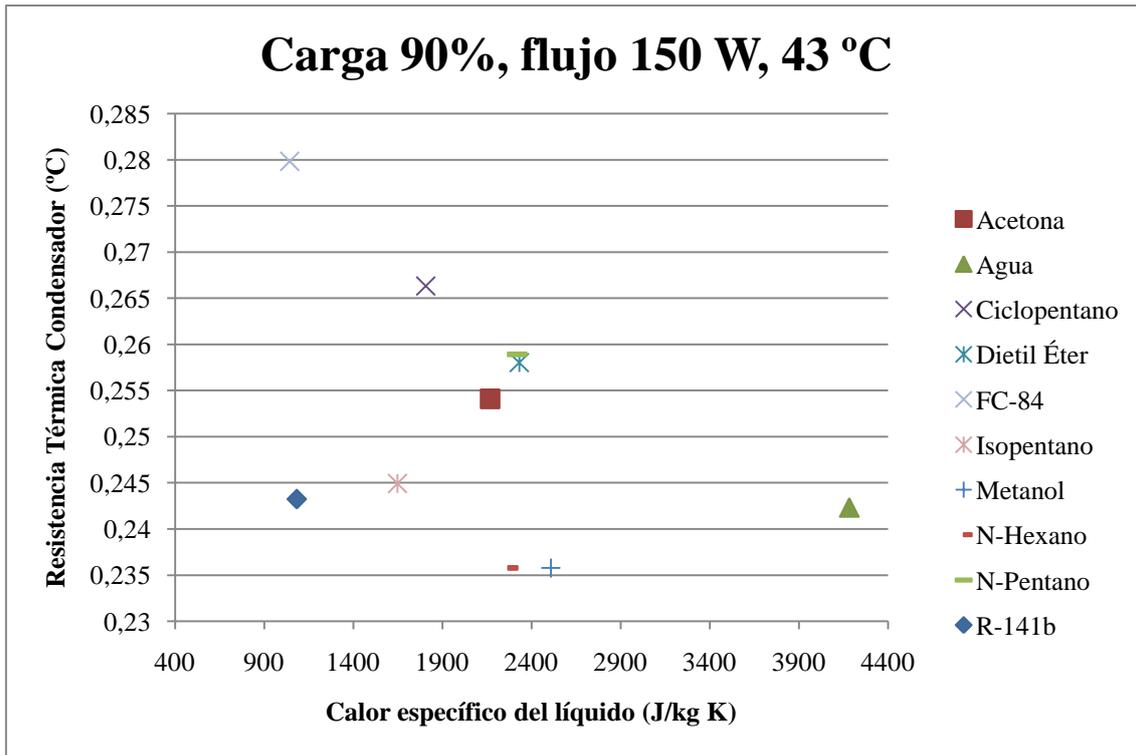
7.4.4 Calor específico del líquido



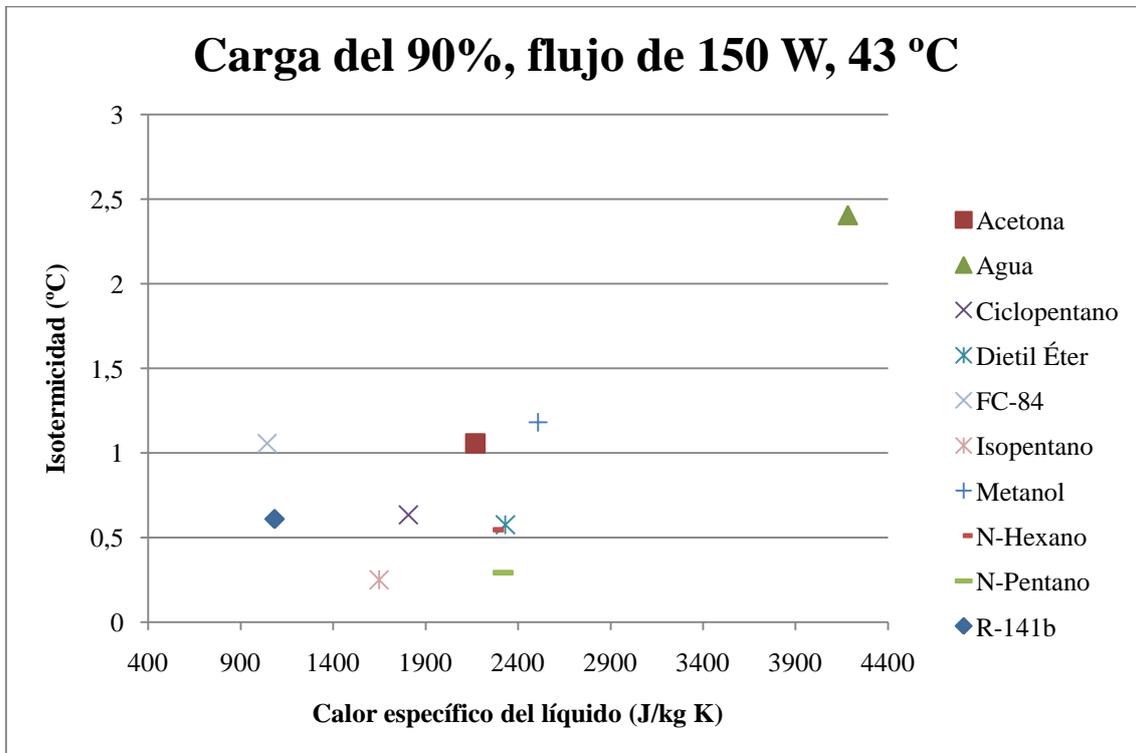
Gráfica 7.4-13 Variación de la resistencia térmica global con respecto al calor específico del líquido.



Gráfica 7.4-14 Variación de la resistencia térmica en el evaporador con respecto al calor específico del líquido.

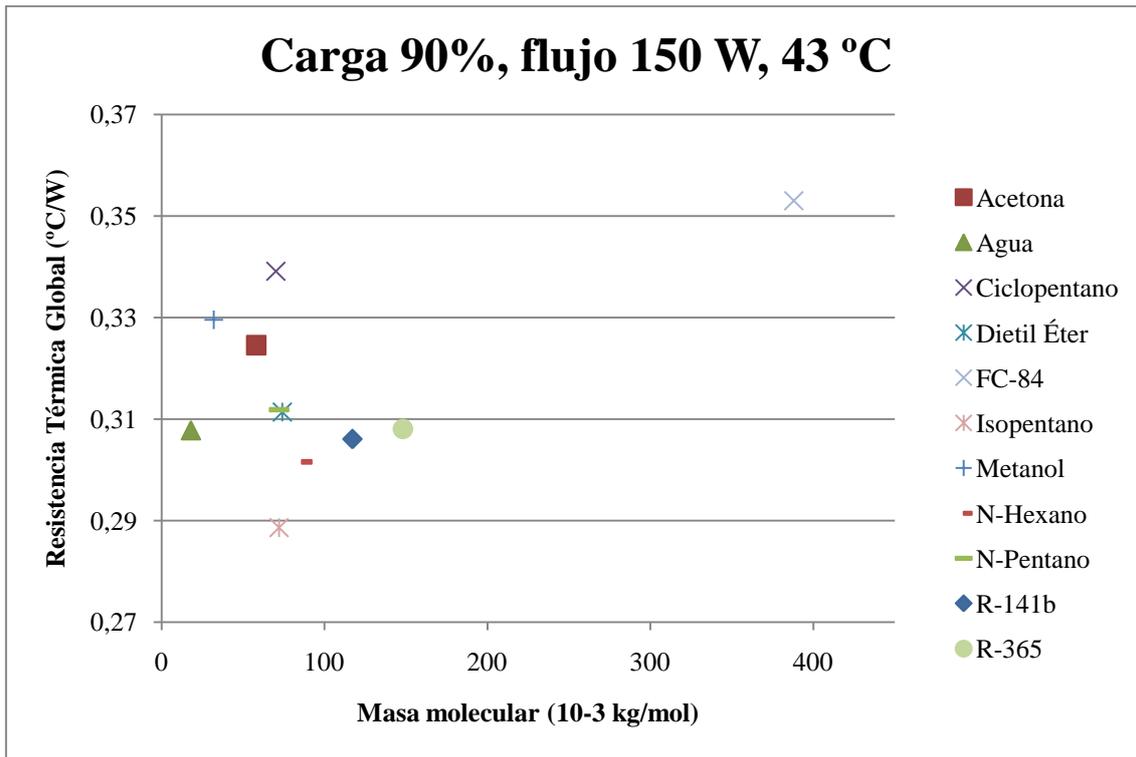


Gráfica 7.4-15 Variación de la resistencia térmica en el condensador con respecto al calor específico del líquido.

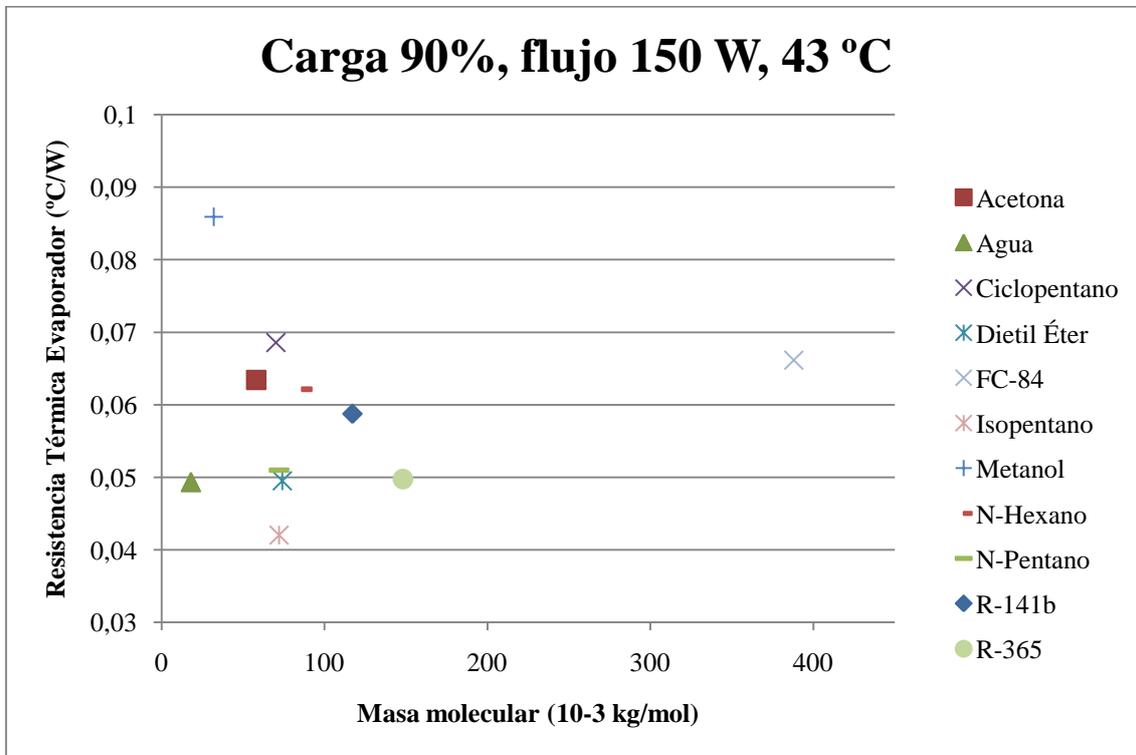


Gráfica 7.4-16 Variación de la isothermicidad con respecto al calor específico del líquido.

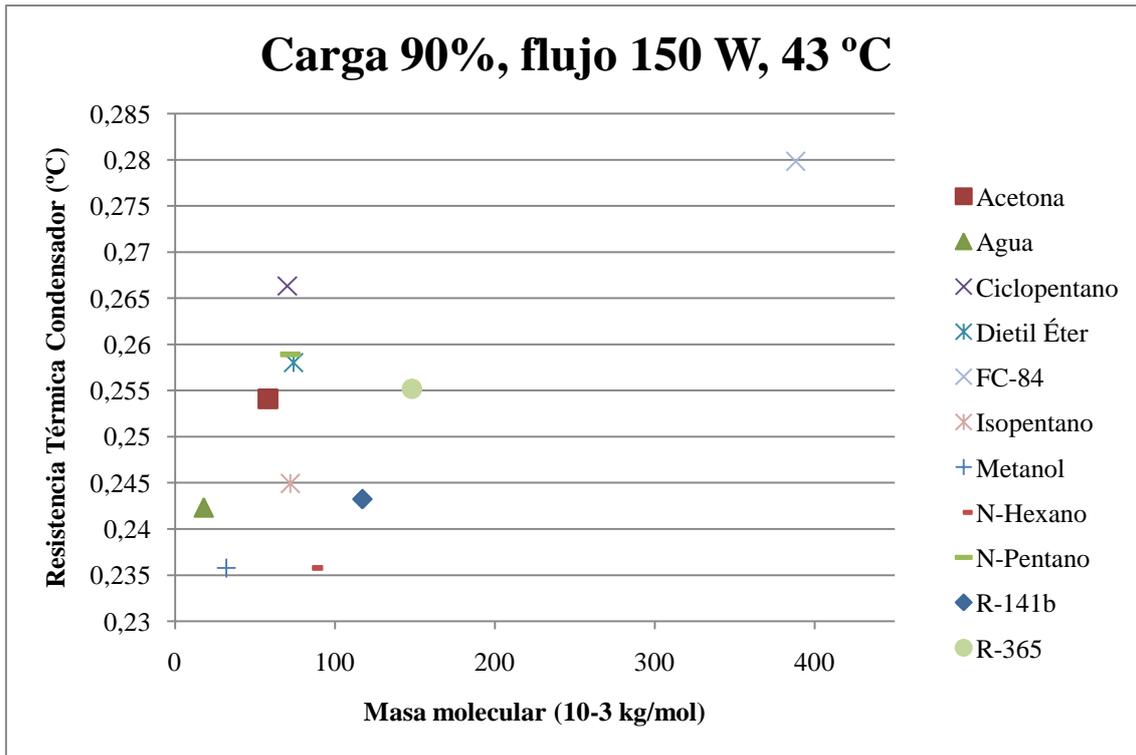
7.4.5 Masa molecular



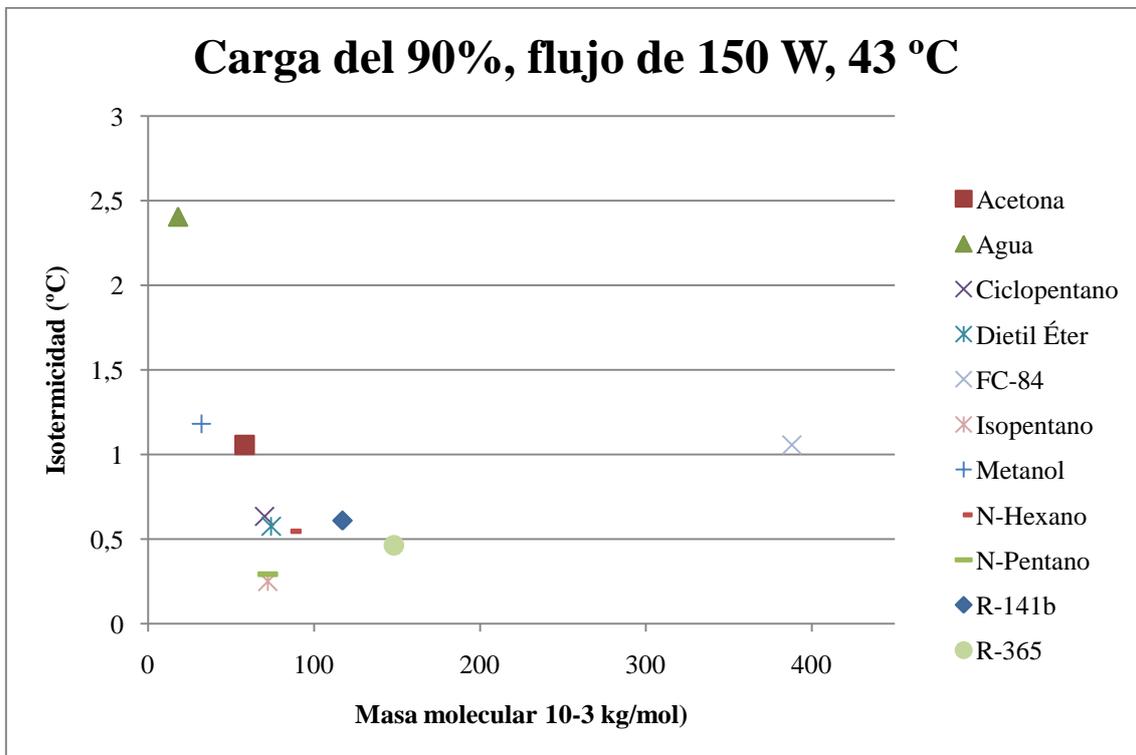
Gráfica 7.4-17 Variación de la resistencia térmica global con respecto a la masa molecular.



Gráfica 7.4-18 Variación de la resistencia térmica en el evaporador con respecto a la masa molecular.



Gráfica 7.4-19 Variación de la resistencia térmica en el condensador con respecto a la masa molecular.



Gráfica 7.4-20 Variación de la isotermicidad con respecto a la masa molecular.

8 COMPARACIÓN ENTRE LOS TERMOSIFONES CILÍNDRICO Y PRISMÁTICO

A continuación se van a comparar los resultados obtenidos en los ensayos con el termosifón cilíndrico frente a los resultados obtenidos con el termosifón prismático. Con el termosifón prismático no se ensayaron todos los fluidos de trabajo utilizados en la investigación con el termosifón cilíndrico. Estos fueron los seis fluidos analizados con el termosifón prismático:

- Acetona-NPentano (mezcla azeotrópica)
- Ciclopentano-Metanol (mezcla azeotrópica)
- Dietil éter
- Dietil éter-Formiato de metilo (mezcla azeotrópica)
- N-Pentano
- R-141b

El comportamiento del termosifón prismático, al igual que el del termosifón cilíndrico, se evaluó mediante la resistencia térmica al paso de calor a través de él. Con este objeto se definió el parámetro Resistencia Térmica Global de la siguiente manera:

$$R_g = \frac{T_{peltier} - T_{ambiente}}{Pot}$$

La $T_{peltier}$ es la temperatura que mide la sonda situada en la cara caliente de la pastilla Peltier (ver Figura 5.2-4 del capítulo 5). La $T_{ambiente}$ es la temperatura que mide la sonda situada en el interior de la cámara climática. Y Pot es la potencia que aporta la fuente de alimentación, medida por medio de los montajes eléctricos explicados en el apartado 5.3.2 del capítulo 5.

Con el termosifón prismático, al igual que con el termosifón cilíndrico y como se explica en el apartado 5.3.3 del capítulo 5, se realizaron tres diferentes cargas con cada fluido de trabajo. A la carga más baja se la nombrará 1ª carga, a la carga media 2ª carga y a la carga más alta 3ª carga.

Como se indicó en la sección 5.3.2 del capítulo 5, los ensayos con el termosifón prismático se dividieron en dos partes: una reúne los ensayos sin control de potencia (SCP) y la otra los ensayos con control de potencia (CCP). Por lo tanto, la comparación entre los dos termosifones se va a dividir también en dos.

Para ver los resultados numéricos de los ensayos con el termosifón cilíndrico que se muestran en el presente capítulo, ver la sección 6.3 del capítulo 6. Para los ensayos con el termosifón prismático consultar el Proyecto Fin de Carrera “Análisis del Comportamiento de un Termosifón con distintos Refrigerantes” realizado por Juan Pablo Navarro Gárriz.

8.1 ENSAYOS SIN CONTROL DE POTENCIA (SCP)

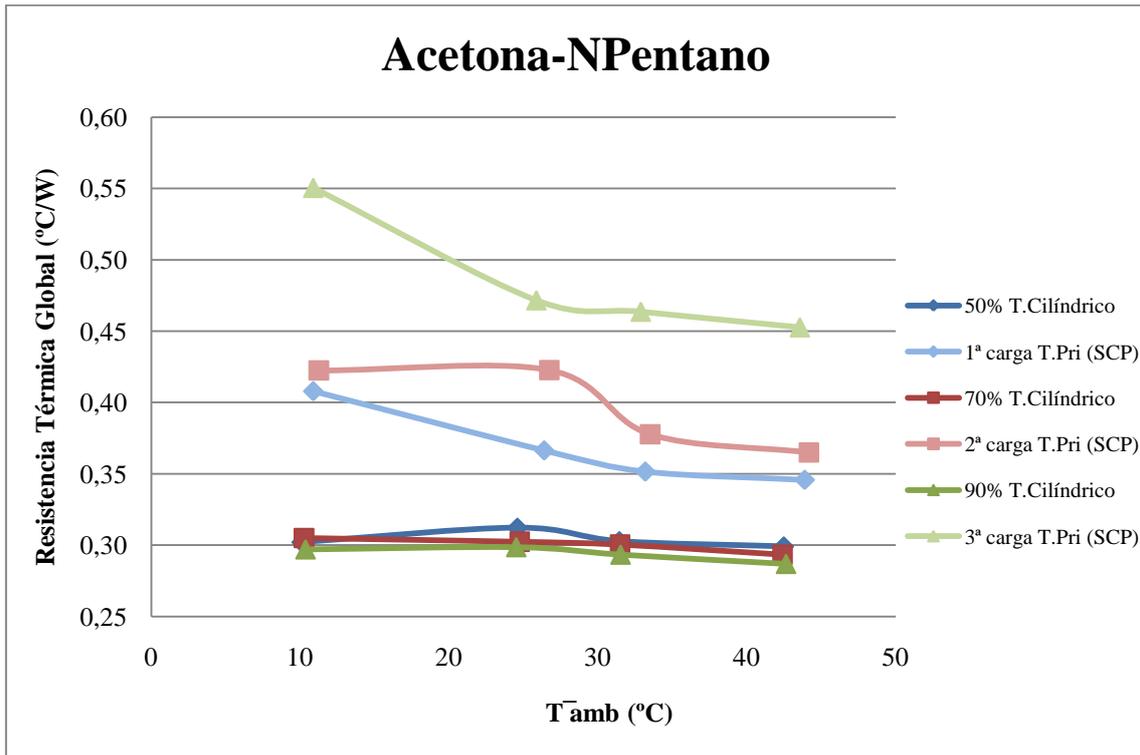
En las comparaciones que se van a realizar a continuación se van a emplear, por un lado, los ensayos con el termosifón cilíndrico con cargas de 50%, 70% y 90%, flujo de calor de 150 W, y

el termosifón en posición vertical. Por otro lado, los ensayos con el termosifón prismático sin control de potencia.

8.1.1 Comparación según la temperatura de la cámara climática y la carga

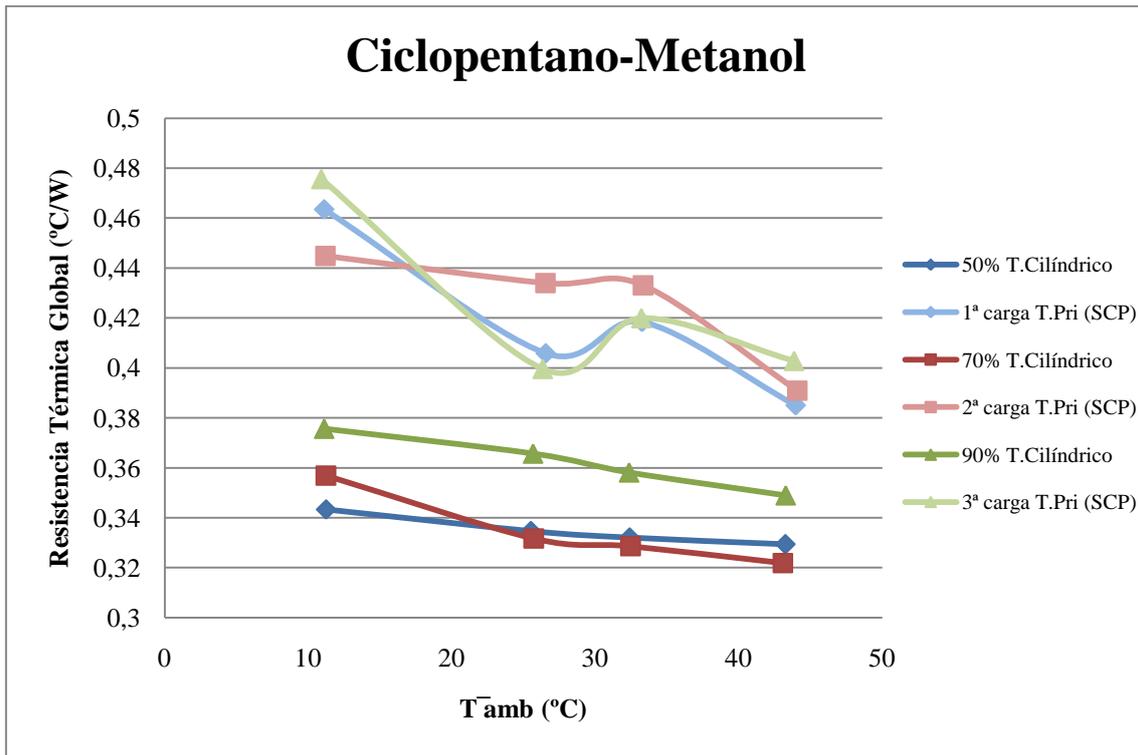
Se va a comparar el comportamiento de los dos termosifones según la variación de la temperatura de la cámara climática y la carga de fluido de trabajo.

8.1.1.1 Mezcla de Acetona-NPentano



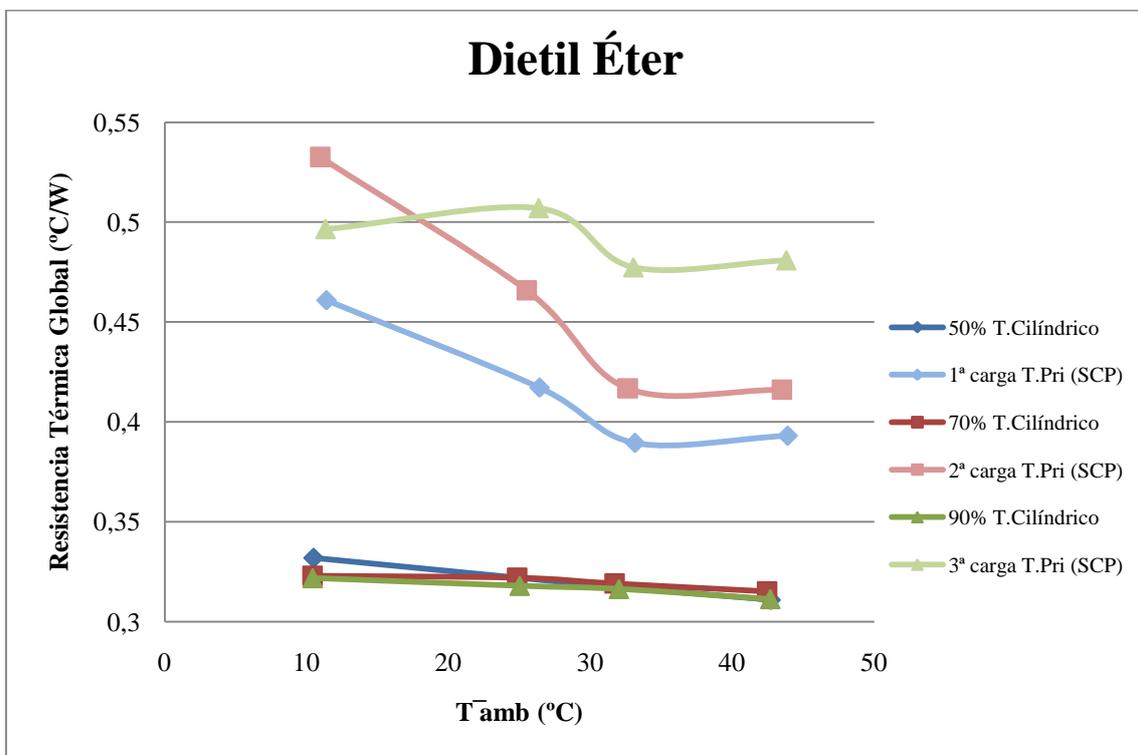
Gráfica 8.1-1 Comparación entre termosifones con la mezcla acetona-Npentano.

8.1.1.2 Mezcla de Ciclopentano-Metanol



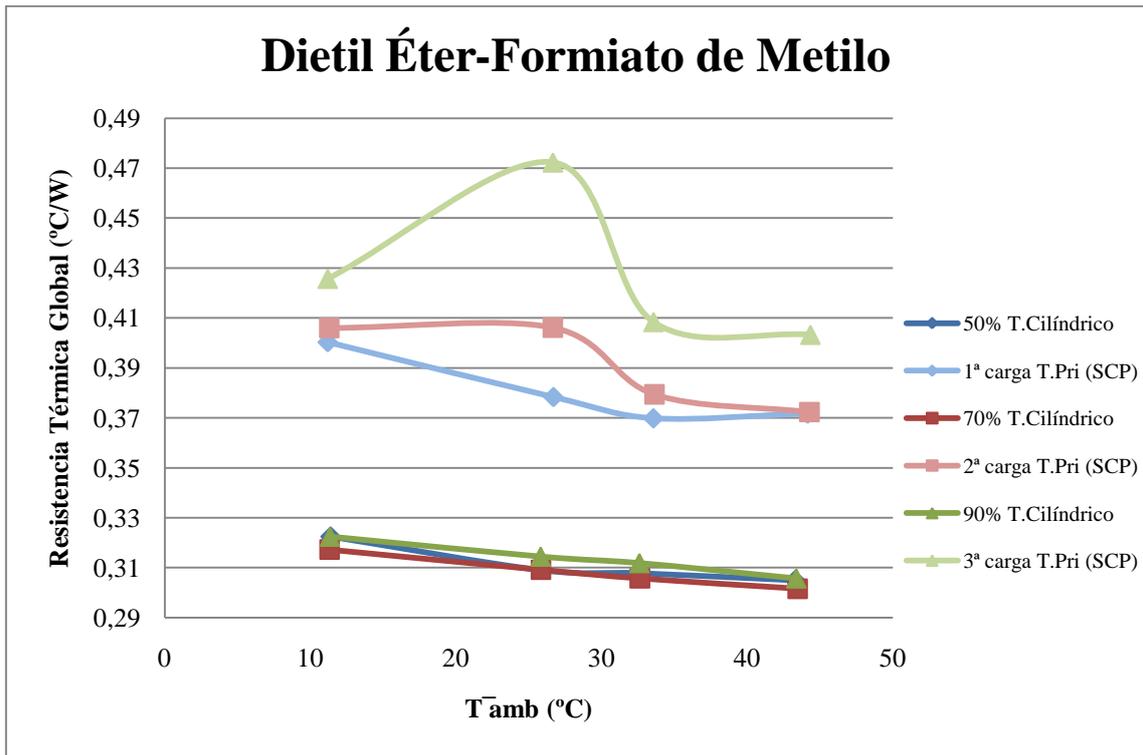
Gráfica 8.1-2 Comparación entre termosifones con la mezcla ciclopentano-metanol.

8.1.1.3 Fluido de trabajo Dietil Éter



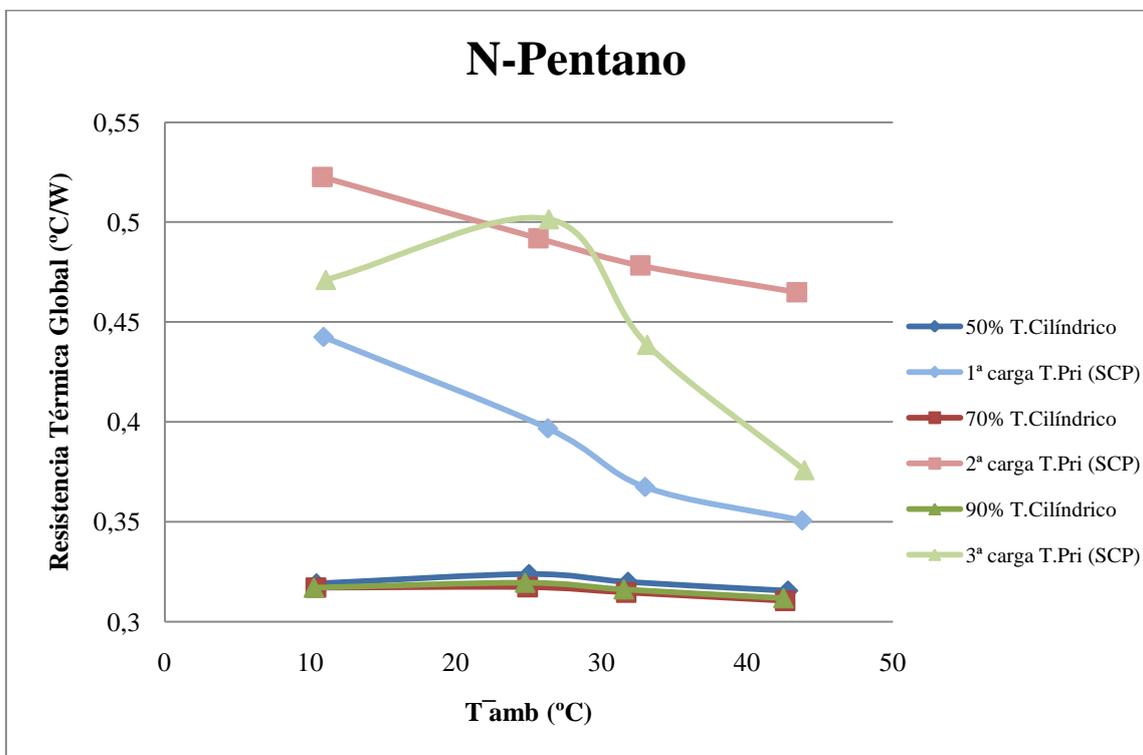
Gráfica 8.1-3 Comparación entre termosifones con la sustancia dietil éter.

8.1.1.4 Mezcla de Dietil Éter-Formiato de Metilo



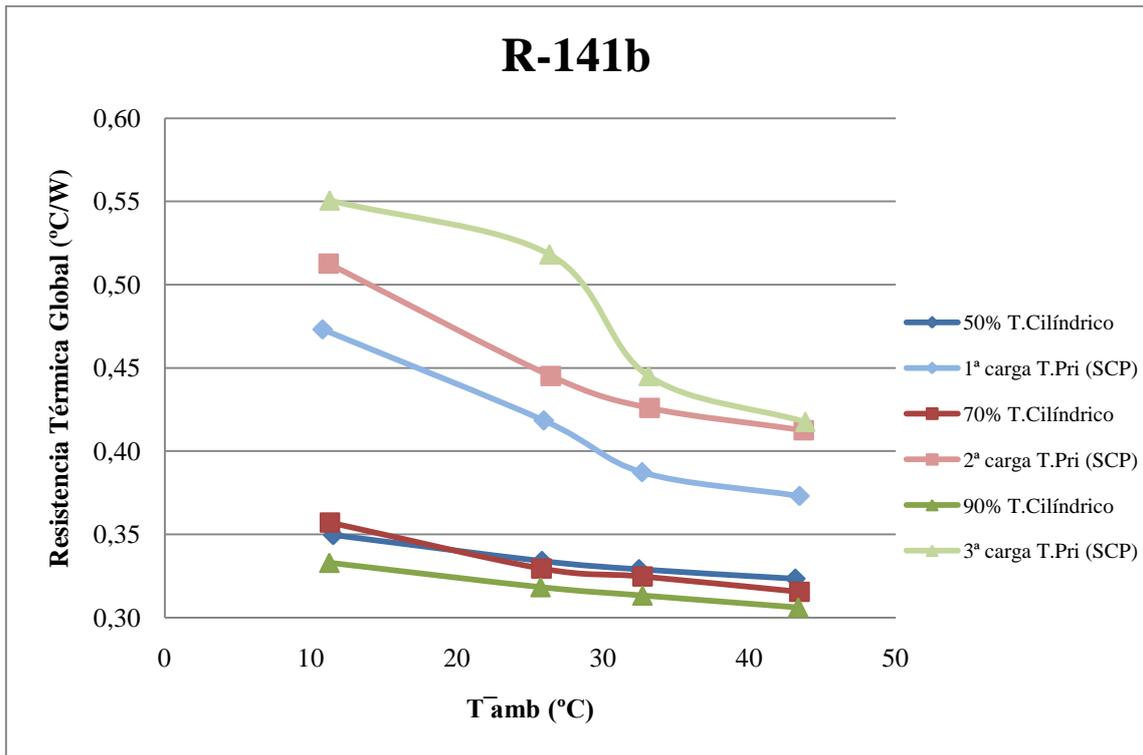
Gráfica 8.1-4 Comparación entre termosifones con la mezcla dietil éter-formiato de metilo.

8.1.1.5 Fluido de trabajo N-Pentano



Gráfica 8.1-5 Comparación entre termosifones con la sustancia N-pentano.

8.1.1.6 Fluido de trabajo R-141b

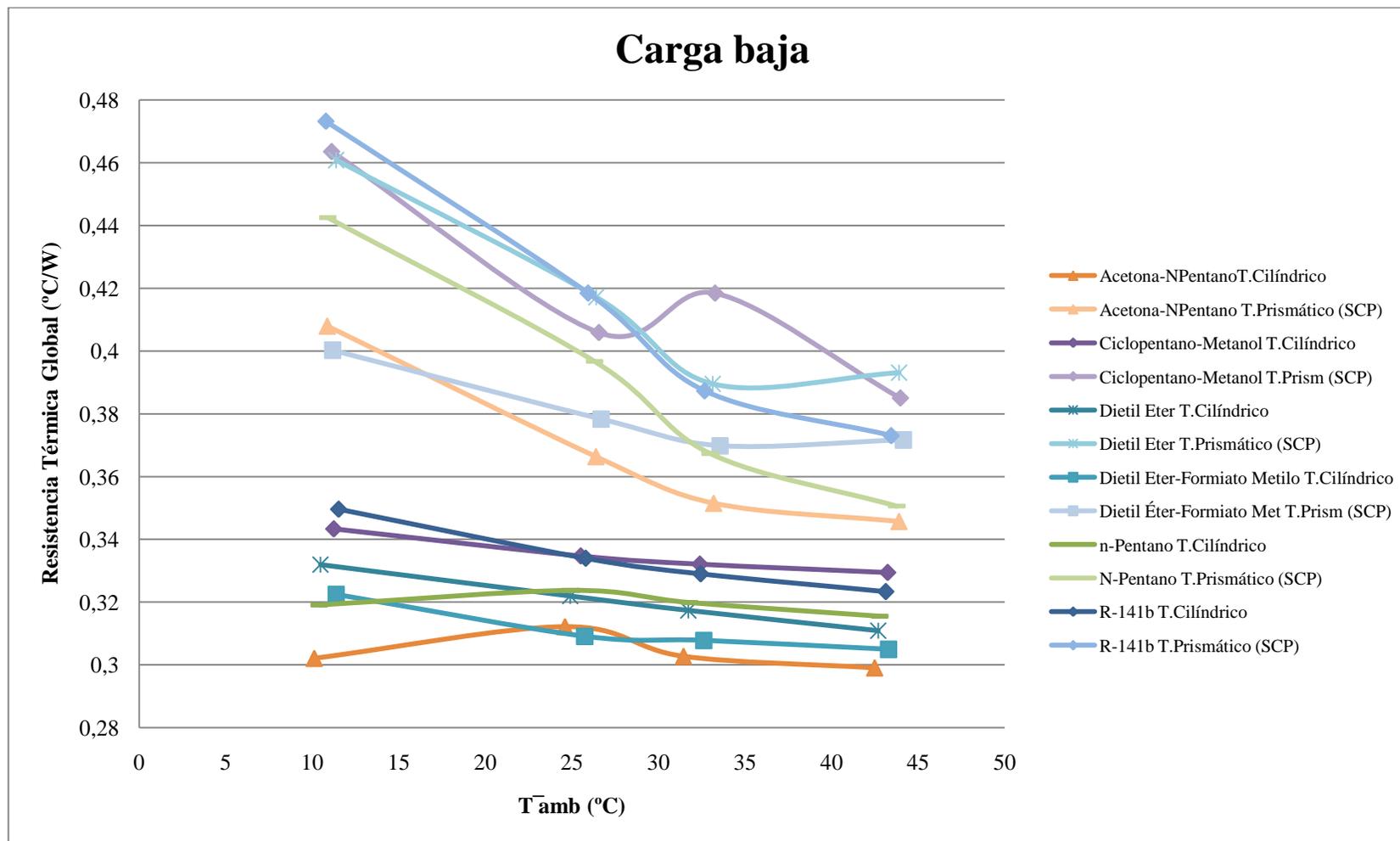


Gráfica 8.1-6 Comparación entre termosifones con la sustancia R-141b.

8.1.2 Comparación según la temperatura de la cámara climática y el fluido de trabajo

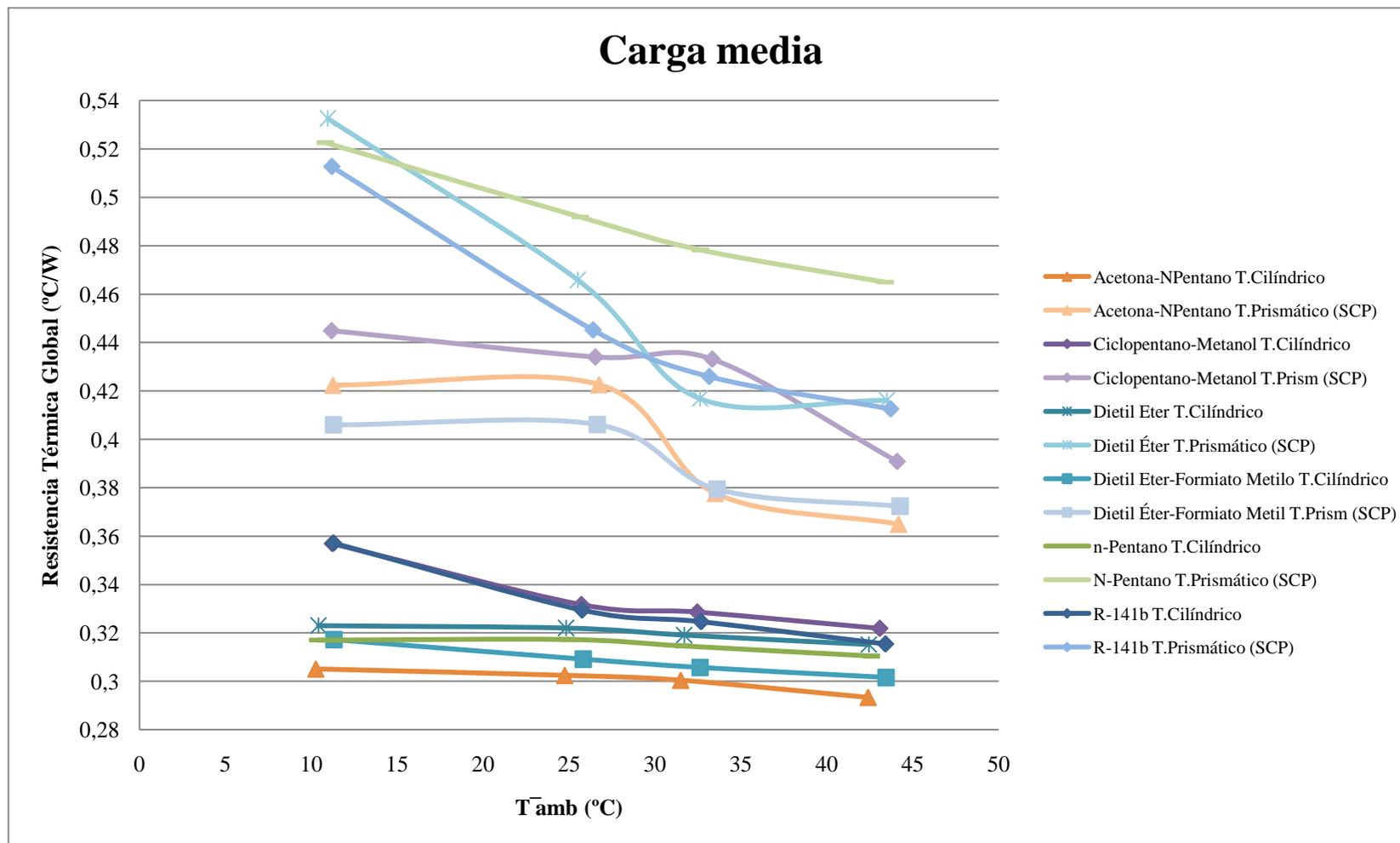
Se va a comparar el comportamiento de los dos termosifones al variar la temperatura de la cámara climática y el fluido de trabajo. Esta comparación se va a dividir en tres partes; en la primera parte se van a comparar los ensayos de carga de fluido más baja (1ª carga en el termosifón prismático, 50% en el termosifón cilíndrico), en la segunda parte los ensayos de carga media (2ª carga en el termosifón prismático, 70% en el termosifón cilíndrico) y en la tercera parte los ensayos de carga más alta (3ª carga en el termosifón prismático, 90% en el termosifón cilíndrico).

8.1.2.1 Ensayos con carga baja



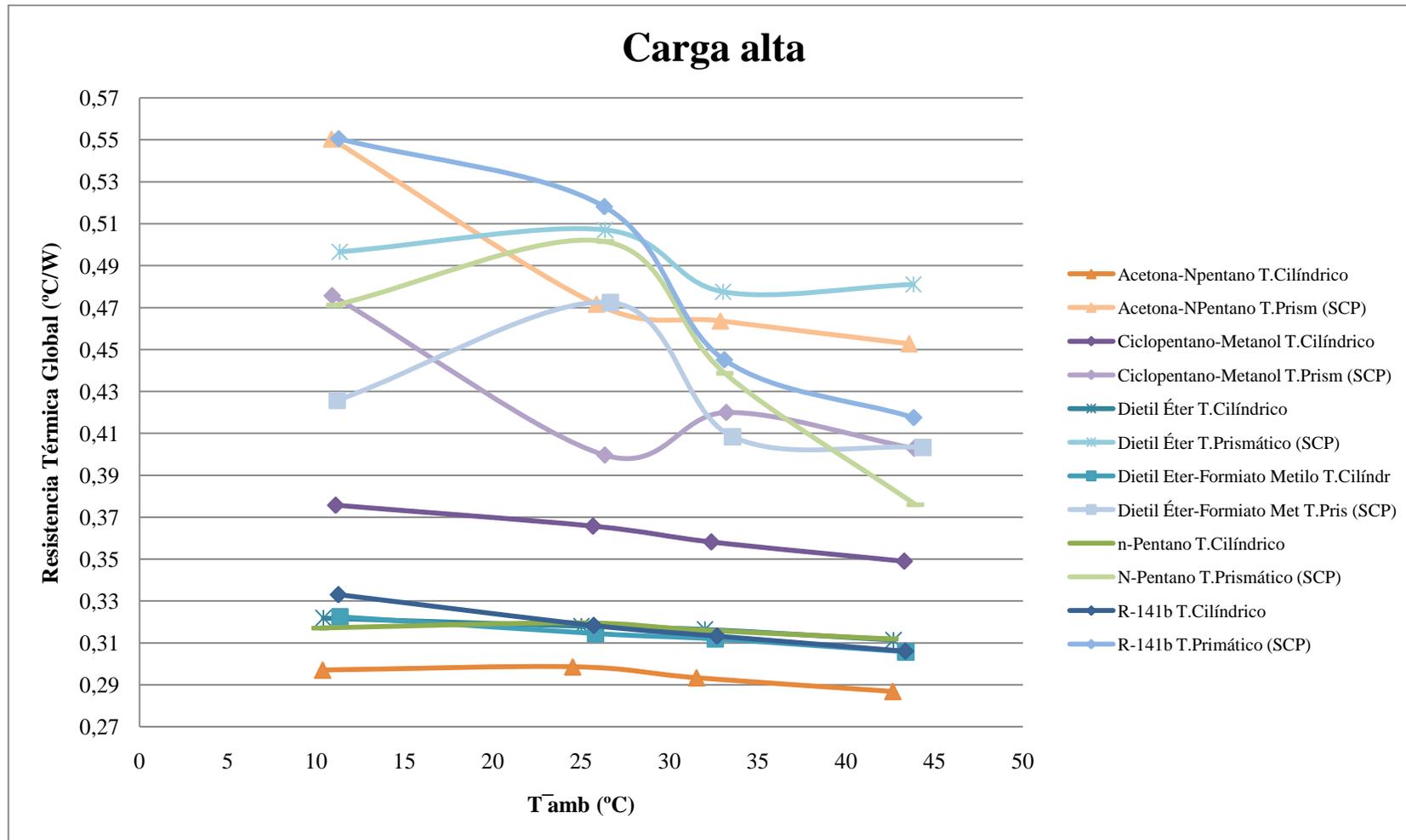
Gráfica 8.1-7 Comparación entre termosifones con ensayos a carga baja.

8.1.2.2 Ensayos con carga media



Gráfica 8.1-8 Comparación entre termosifones con ensayos a carga media.

8.1.2.3 Ensayos con carga alta



Gráfica 8.1-9 Comparación entre termosifones con ensayos a carga alta.

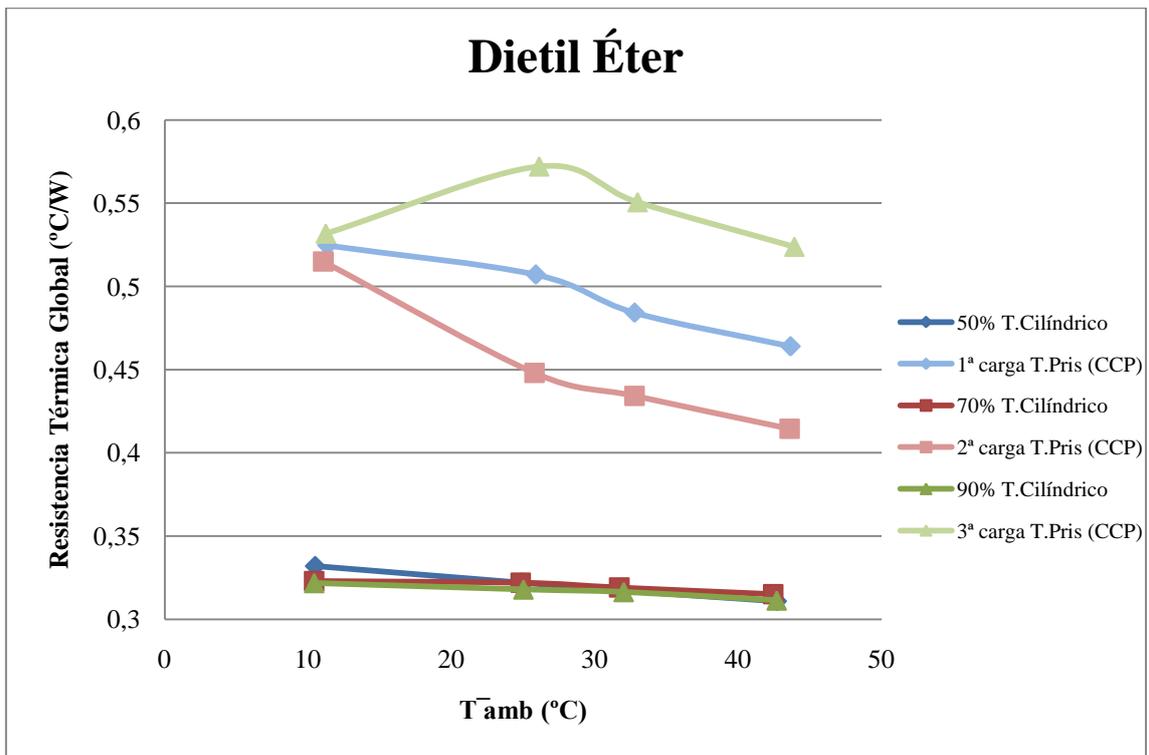
8.2 ENSAYOS CON CONTROL DE POTENCIA (CCP)

En las comparaciones que se van a realizar a continuación se van a emplear, por un lado, los ensayos con el termosifón cilíndrico con cargas de 50%, 70% y 90%, flujo de calor de 150 W, y el termosifón en posición vertical. Por otro lado, los ensayos con el termosifón prismático con control de potencia. Para los ensayos con el termosifón prismático con control de potencia no se emplearon las mezclas azeotrópicas; con lo que se ensayó con el dietil éter, el N-pentano y el R-141b.

8.2.1 Comparación según la temperatura de la cámara climática y la carga

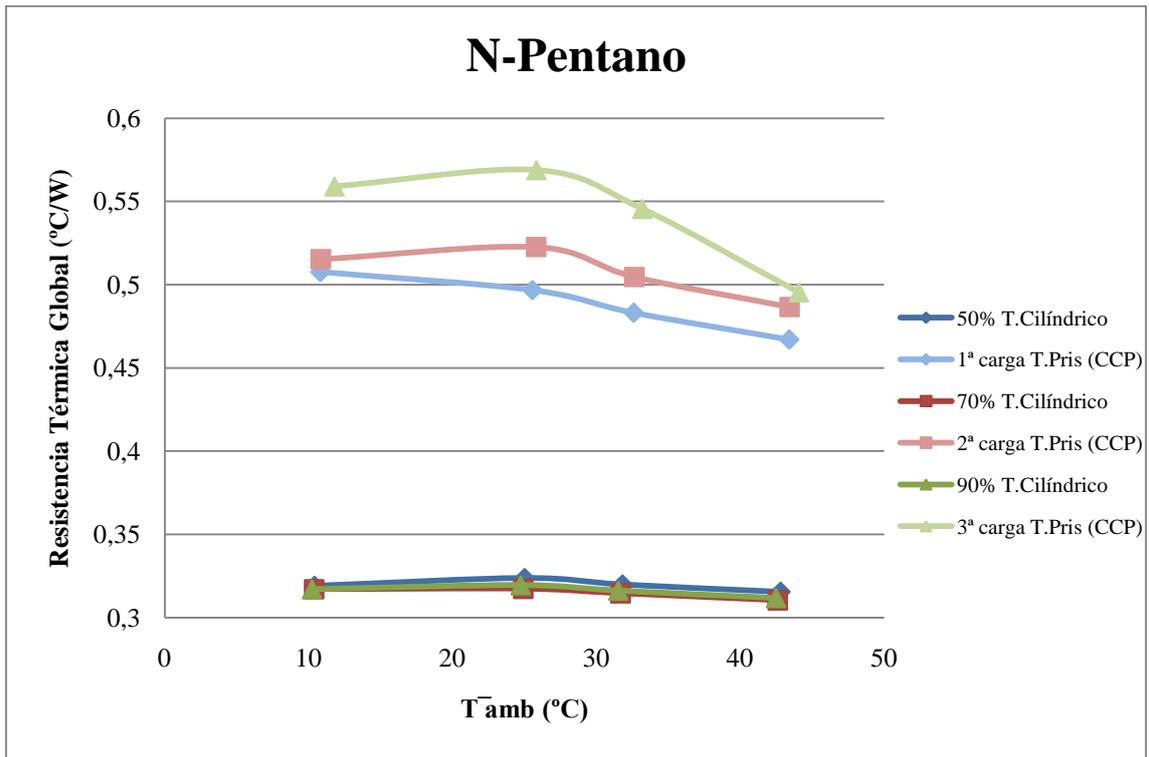
Se va a comparar el comportamiento de los dos termosifones según la variación de la temperatura de la cámara climática y la carga de fluido de trabajo.

8.2.1.1 Fluido de trabajo Dietil Éter



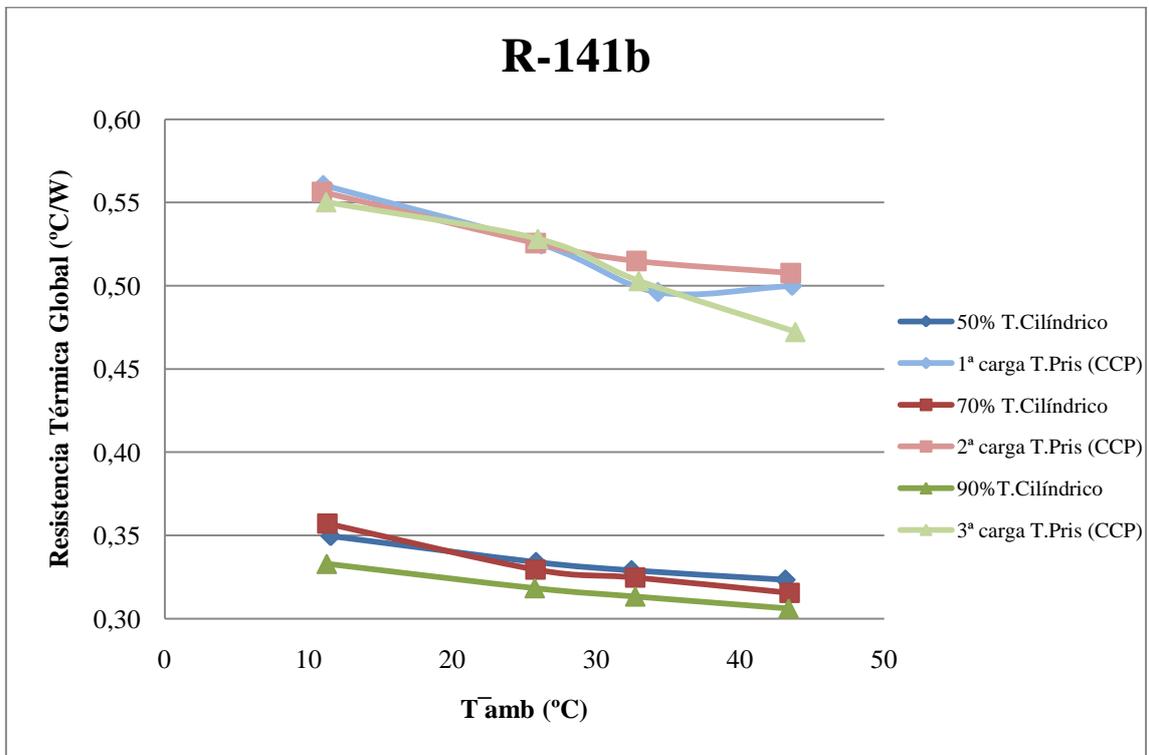
Gráfica 8.2-1 Comparación entre termosifones con la sustancia dietil éter.

8.2.1.2 Fluido de trabajo N-Pentano



Gráfica 8.2-2 Comparación entre termosifones con la sustancia N-pentano.

8.2.1.3 Fluido de trabajo R-141b

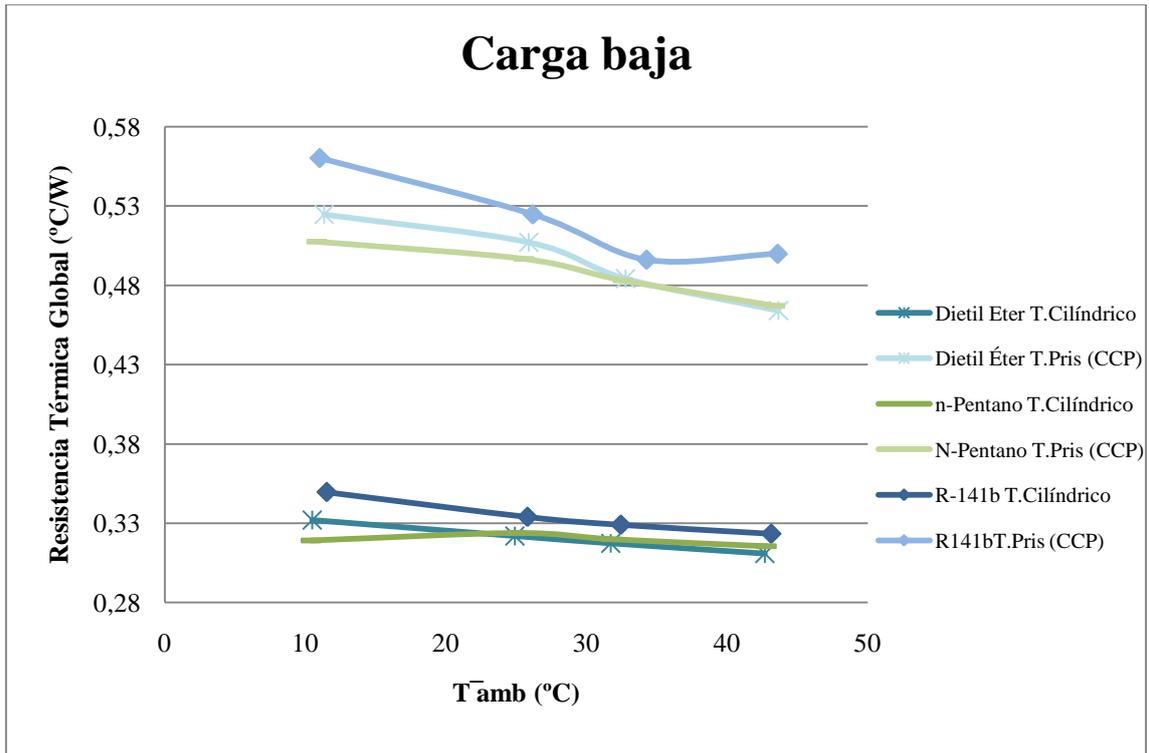


Gráfica 8.2-3 Comparación entre termosifones con la sustancia R-141b.

8.2.2 Comparación según la temperatura de la cámara climática y el fluido de trabajo

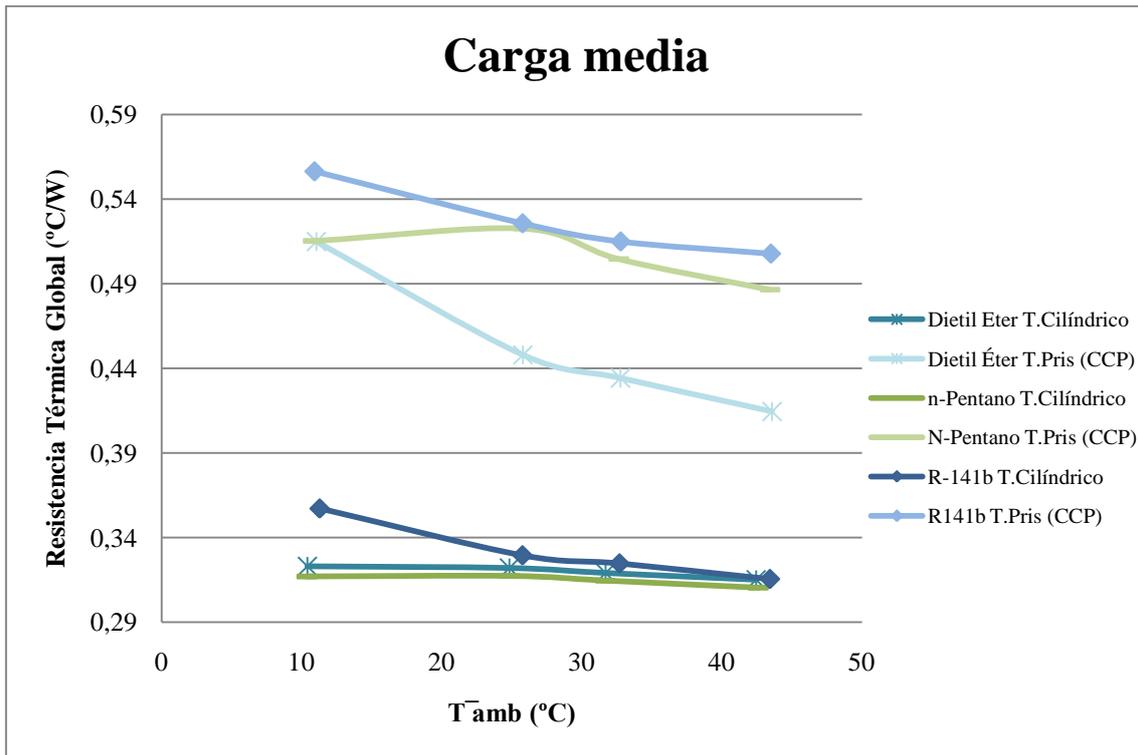
Se va a comparar el comportamiento de los dos termosifones al variar la temperatura de la cámara climática y el fluido de trabajo. Esta comparación se va a dividir en tres partes; en la primera parte se van a comparar los ensayos de carga de fluido más baja (1ª carga en el termosifón prismático, 50% en el termosifón cilíndrico), en la segunda parte los ensayos de carga media (2ª carga en el termosifón prismático, 70% en el termosifón cilíndrico) y en la tercera parte los ensayos de carga más alta (3ª carga en el termosifón prismático, 90% en el termosifón cilíndrico).

8.2.2.1 Ensayos con carga baja



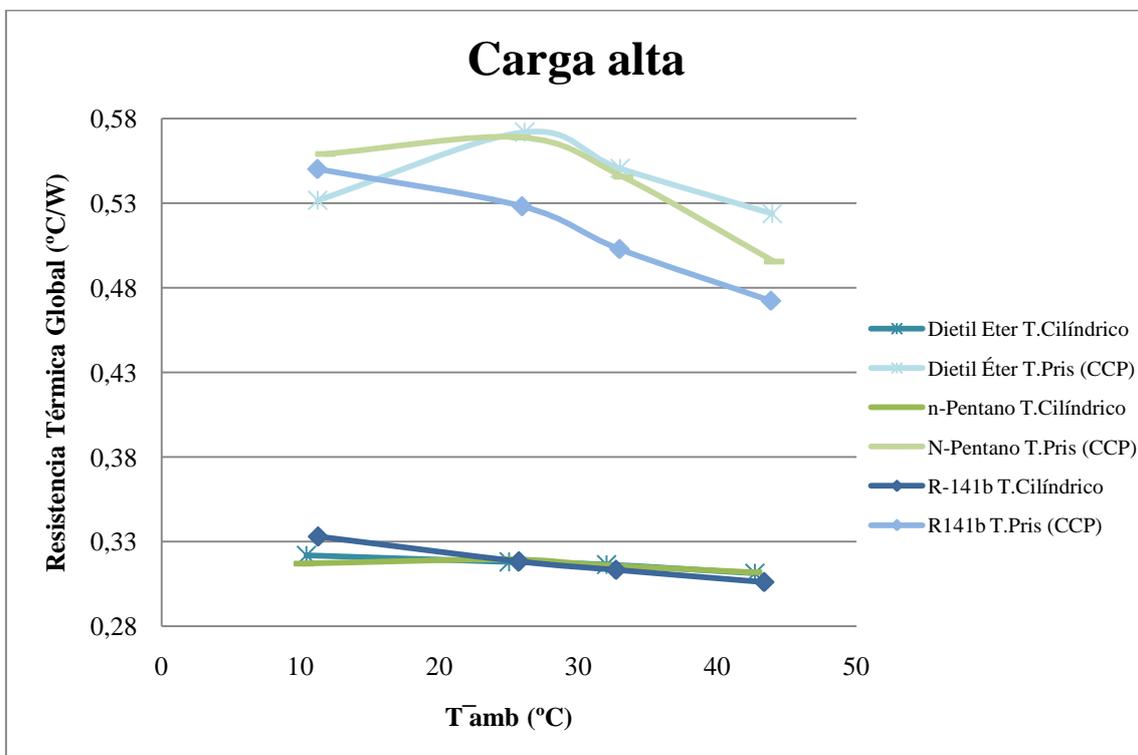
Gráfica 8.2-4 Comparación entre termosifones con ensayos a carga baja.

8.2.2.2 Ensayos con carga media



Gráfica 8.2-5 Comparación entre termosifones con ensayos a carga media.

8.2.2.3 Ensayos con carga alta



Gráfica 8.2-6 Comparación entre termosifones con ensayos a carga alta.

8.3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS CON LOS TERMOSIFONES CILÍNDRICO Y PRISMÁTICO

Para finalizar con la comparación entre el termosifón cilíndrico y el termosifón prismático, se van a ordenar los resultados de los ensayos presentados en este capítulo según la resistencia térmica global. Se listan los resultados, primero diferenciando entre termosifón cilíndrico y termosifón prismático, luego según la sustancia de trabajo, seguido de la carga, y finalmente la temperatura ambiente media. Se va dividir esta comparación en dos grupos, como se ha venido haciendo en este capítulo, primero comparando los ensayos con el termosifón cilíndrico con los ensayos con el prismático sin control de potencia (SCP), y finalmente comparando los ensayos con el termosifón cilíndrico con los ensayos con el prismático con control de potencia (SCP).

8.3.1 Ensayos con el termosifón cilíndrico y con el termosifón prismático SCP

Termosifón cilíndrico				Termosifón prismático			
Sustancia	Carga	\bar{T}_{amb} (°C)	R_g (°C/W)	Sustancia	Carga	\bar{T}_{amb} (°C)	R_g (°C/W)
Acetona-NPentano	90%	42,64	0,287	Acetona-Npentano	1 ^a	43,89	0,346
Acetona-NPentano	70%	42,41	0,293	N-Pentano	1 ^a	43,76	0,351
Acetona-NPentano	90%	31,53	0,293	Acetona-Npentano	1 ^a	33,18	0,352
Acetona-NPentano	90%	10,36	0,297	Acetona-Npentano	2 ^a	44,17	0,365
Acetona-NPentano	90%	24,52	0,299	Acetona-Npentano	1 ^a	26,38	0,366
Acetona-NPentano	50%	42,49	0,299	N-Pentano	1 ^a	32,98	0,367
Acetona-NPentano	70%	31,50	0,300	Dietil Éter-Formiato de Metilo	1 ^a	33,55	0,370
Dietil Éter-Formiato de Metilo	70%	43,45	0,302	Dietil Éter-Formiato de Metilo	1 ^a	44,14	0,372
Acetona-NPentano	50%	10,11	0,302	Dietil Éter-Formiato de Metilo	2 ^a	44,26	0,372
Acetona-NPentano	70%	24,74	0,302	R-141b	1 ^a	43,43	0,373
Acetona-NPentano	50%	31,44	0,303	N-Pentano	3 ^a	43,91	0,376
Dietil Éter-Formiato de Metilo	50%	43,28	0,305	Acetona-Npentano	2 ^a	33,51	0,378
Acetona-NPentano	70%	10,25	0,305	Dietil Éter-Formiato de Metilo	1 ^a	26,68	0,378
Dietil Éter-Formiato de Metilo	70%	32,62	0,306	Dietil Éter-Formiato de Metilo	2 ^a	33,62	0,379
Dietil Éter-Formiato de Metilo	90%	43,37	0,306	Ciclopentano-Metanol	1 ^a	43,96	0,385
R-141b	90%	43,34	0,306	R-141b	1 ^a	32,66	0,387
Dietil Éter-Formiato de Metilo	50%	32,61	0,308	Dietil Éter	1 ^a	33,13	0,390
Dietil Éter-Formiato de Metilo	50%	25,73	0,309	Ciclopentano-Metanol	2 ^a	44,09	0,391
Dietil Éter-Formiato de Metilo	70%	25,83	0,309	Dietil Éter	1 ^a	43,89	0,393

Tabla 8.3-1 Clasificación de los resultados con los termosifones cilíndrico y prismático SCP.

Termosifón cilíndrico				Termosifón prismático			
Sustancia	Carga	\bar{T}_{amb} (°C)	Rg (°C/W)	Sustancia	Carga	\bar{T}_{amb} (°C)	Rg (°C/W)
N-Pentano	70%	42,60	0,310	N-Pentano	1 ^a	26,30	0,397
Dietil Éter	50%	42,69	0,311	Ciclopentano-Metanol	3 ^a	26,34	0,400
Dietil Éter	90%	42,68	0,311	Dietil Éter-Formiato de Metilo	1 ^a	11,17	0,400
Dietil Éter-Formiato de Metilo	90%	32,59	0,312	Ciclopentano-Metanol	3 ^a	43,85	0,403
N-Pentano	90%	42,47	0,312	Dietil Éter-Formiato de Metilo	3 ^a	44,34	0,403
Acetona-NPentano	50%	24,59	0,312	Ciclopentano-Metanol	1 ^a	26,55	0,406
R-141b	90%	32,69	0,313	Dietil Éter-Formiato de Metilo	2 ^a	11,28	0,406
Dietil Éter-Formiato de Metilo	90%	25,81	0,314	Dietil Éter-Formiato de Metilo	2 ^a	26,64	0,406
N-Pentano	70%	31,67	0,315	Acetona-NPentano	1 ^a	10,87	0,408
Dietil Éter	70%	42,44	0,315	Dietil Éter-Formiato de Metilo	3 ^a	33,56	0,408
R-141b	70%	43,42	0,315	R-141b	2 ^a	43,71	0,413
N-Pentano	50%	42,79	0,315	Dietil Éter	2 ^a	43,49	0,416
N-Pentano	90%	31,51	0,316	Dietil Éter	2 ^a	32,62	0,417
Dietil Éter	90%	32,00	0,316	Dietil Éter	1 ^a	26,40	0,417
N-Pentano	70%	10,37	0,317	R-141b	3 ^a	43,82	0,417
N-Pentano	90%	10,23	0,317	Ciclopentano-Metanol	1 ^a	33,26	0,418
Dietil Éter-Formiato de Metilo	70%	11,31	0,317	R-141b	1 ^a	25,93	0,418
N-Pentano	70%	24,90	0,317	Ciclopentano-Metanol	3 ^a	33,21	0,420
Dietil Éter	50%	31,72	0,317	Acetona-Npentano	2 ^a	11,25	0,422
Dietil Éter	90%	25,01	0,318	Acetona-Npentano	2 ^a	26,73	0,423
R-141b	90%	25,71	0,318	Dietil Éter-Formiato de Metilo	3 ^a	11,19	0,426
N-Pentano	50%	10,40	0,319	R-141b	2 ^a	33,16	0,426
Dietil Éter	70%	31,70	0,319	Ciclopentano-Metanol	2 ^a	33,33	0,433
N-Pentano	90%	24,73	0,320	Ciclopentano-Metanol	2 ^a	26,53	0,434
N-Pentano	50%	31,80	0,320	N-Pentano	3 ^a	33,12	0,439
Ciclopentano-Metanol	70%	43,08	0,322	N-Pentano	1 ^a	10,89	0,443
Dietil Éter	90%	10,41	0,322	Ciclopentano-Metanol	2 ^a	11,18	0,445
Dietil Éter	50%	24,90	0,322	R-141b	3 ^a	33,10	0,445
Dietil Éter	70%	24,82	0,322	R-141b	2 ^a	26,40	0,445
Dietil Éter-Formiato de Metilo	50%	11,37	0,322	Acetona-Npentano	3 ^a	43,57	0,453
Dietil Éter-Formiato de Metilo	90%	11,34	0,322	Dietil Éter	1 ^a	11,37	0,461
Dietil Éter	70%	10,41	0,323	Ciclopentano-Metanol	1 ^a	11,11	0,464
R-141b	50%	43,13	0,323	Acetona-Npentano	3 ^a	32,88	0,464

Tabla 8.3-2 Clasificación de los resultados con los termosifones cilíndrico y prismático SCP (continuación).

Termosifón cilíndrico				Termosifón prismático			
Sustancia	Carga	\bar{T}_{amb} (°C)	R_g (°C/W)	Sustancia	Carga	\bar{T}_{amb} (°C)	R_g (°C/W)
N-Pentano	50%	25,00	0,324	N-Pentano	2 ^a	43,40	0,465
R-141b	70%	32,69	0,325	Dietil Éter	2 ^a	25,50	0,466
Ciclopentano-Metanol	70%	32,45	0,329	N-Pentano	3 ^a	11,05	0,471
R-141b	50%	32,43	0,329	Acetona-Npentano	3 ^a	25,86	0,472
Ciclopentano-Metanol	50%	43,24	0,329	Dietil Éter-Formiato de Metilo	3 ^a	26,65	0,472
R-141b	70%	25,76	0,329	R-141b	1 ^a	10,79	0,473
Ciclopentano-Metanol	70%	25,71	0,332	Ciclopentano-Metanol	3 ^a	10,91	0,476
Dietil Éter	50%	10,47	0,332	Dietil Éter	3 ^a	33,03	0,477
Ciclopentano-Metanol	50%	32,39	0,332	N-Pentano	2 ^a	32,64	0,478
R-141b	90%	11,26	0,333	Dietil Éter	3 ^a	43,81	0,481
R-141b	50%	25,79	0,334	N-Pentano	2 ^a	25,65	0,492
Ciclopentano-Metanol	50%	25,51	0,335	Dietil Éter	3 ^a	11,33	0,497
Ciclopentano-Metanol	50%	11,24	0,343	N-Pentano	3 ^a	26,37	0,502
Ciclopentano-Metanol	90%	43,28	0,349	Dietil Éter	3 ^a	26,35	0,507
R-141b	50%	11,51	0,350	R-141b	2 ^a	11,20	0,513
Ciclopentano-Metanol	70%	11,22	0,357	R-141b	3 ^a	26,31	0,518
R-141b	70%	11,29	0,357	N-Pentano	2 ^a	10,81	0,523
Ciclopentano-Metanol	90%	32,36	0,358	Dietil Éter	2 ^a	10,95	0,533
Ciclopentano-Metanol	90%	25,67	0,366	Acetona-Npentano	3 ^a	10,86	0,550
Ciclopentano-Metanol	90%	11,10	0,376	R-141b	3 ^a	11,27	0,551

Tabla 8.3-3 Clasificación de los resultados con los termosifones cilíndrico y prismático SCP (continuación).

8.3.2 Ensayos termosifón cilíndrico y termosifón prismático CCP

Termosifón cilíndrico				Termosifón prismático			
Sustancia	Carga	\bar{T}_{amb} (°C)	R_g (°C/W)	Sustancia	Carga	\bar{T}_{amb} (°C)	R_g (°C/W)
R-141b	90%	43,34	0,306	Dietil Éter	2 ^a	43,58	0,414
N-Pentano	70%	42,60	0,310	Dietil Éter	2 ^a	32,76	0,434
Dietil Éter	50%	42,69	0,311	Dietil Éter	2 ^a	25,78	0,448
Dietil Éter	90%	42,68	0,311	Dietil Éter	1 ^a	43,65	0,464
N-Pentano	90%	42,47	0,312	N-Pentano	1 ^a	43,40	0,467
R-141b	90%	32,69	0,313	R-141b	3 ^a	43,83	0,472
N-Pentano	70%	31,67	0,315	N-Pentano	1 ^a	32,59	0,483
Dietil Éter	70%	42,44	0,315	Dietil Éter	1 ^a	32,77	0,484
R-141b	70%	43,42	0,315	N-Pentano	2 ^a	43,43	0,487
N-Pentano	50%	42,79	0,315	N-Pentano	3 ^a	44,07	0,495
N-Pentano	90%	31,51	0,316	R-141b	1 ^a	34,27	0,496
Dietil Éter	90%	32,00	0,316	N-Pentano	1 ^a	25,54	0,497
N-Pentano	70%	10,37	0,317	R-141b	1 ^a	43,61	0,500
N-Pentano	90%	10,23	0,317	R-141b	3 ^a	32,94	0,503
N-Pentano	70%	24,90	0,317	N-Pentano	2 ^a	32,63	0,505
Dietil Éter	50%	31,72	0,317	Dietil Éter	1 ^a	25,88	0,507
Dietil Éter	90%	25,01	0,318	N-Pentano	1 ^a	10,80	0,508
R-141b	90%	25,71	0,318	R-141b	2 ^a	43,50	0,508
N-Pentano	50%	10,40	0,319	R-141b	2 ^a	32,77	0,515
Dietil Éter	70%	31,70	0,319	Dietil Éter	2 ^a	11,05	0,515
N-Pentano	90%	24,73	0,320	N-Pentano	2 ^a	10,83	0,515
N-Pentano	50%	31,80	0,320	N-Pentano	2 ^a	25,80	0,523
Dietil Éter	90%	10,41	0,322	Dietil Éter	3 ^a	43,93	0,524
Dietil Éter	50%	24,90	0,322	Dietil Éter	1 ^a	11,32	0,525
Dietil Éter	70%	24,82	0,322	R-141b	1 ^a	26,18	0,525
Dietil Éter	70%	10,41	0,323	R-141b	2 ^a	25,77	0,526
R-141b	50%	43,13	0,323	R-141b	3 ^a	25,93	0,528
N-Pentano	50%	25,00	0,324	Dietil Éter	3 ^a	11,23	0,532
R-141b	70%	32,69	0,325	N-Pentano	3 ^a	33,18	0,546
R-141b	50%	32,43	0,329	R-141b	3 ^a	11,21	0,550
R-141b	70%	25,76	0,329	Dietil Éter	3 ^a	32,99	0,551
Dietil Éter	50%	10,47	0,332	R-141b	2 ^a	10,90	0,556
R-141b	90%	11,26	0,333	N-Pentano	3 ^a	11,78	0,559
R-141b	50%	25,79	0,334	R-141b	1 ^a	11,00	0,560
R-141b	50%	11,51	0,350	N-Pentano	3 ^a	25,82	0,569
R-141b	70%	11,29	0,357	Dietil Éter	3 ^a	26,12	0,572

Tabla 8.3-4 Clasificación de los resultados con los termosifones cilíndrico y prismático CCP.

9 CONCLUSIONES

9.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

- Dependencia del comportamiento del termosifón cilíndrico con el fluido de trabajo:** Independientemente de la carga empleada o de las condiciones de temperatura en la cámara climática, se pueden apreciar diferencias significativas en el comportamiento del termosifón al trabajar con los diferentes fluidos de trabajo ensayados. Para las condiciones de trabajo mostradas en la Tabla 9-1 (carga del 90%, 150 W, posición vertical y 43 °C de la cámara climática), según el fluido utilizado se pueden tener diferencias en el rendimiento global del termosifón de hasta un 23,1%; las diferencias en el evaporador pueden ser de hasta un 104,4%; en el condensador un 18,7%; y en la isothermicidad del termosifón de hasta 372,8% (se ha obviado el resultado del ciclopentano-metanol y el agua por considerarlos erróneos).

Fluido de trabajo	Valor relativo R_e (%)	Fluido de trabajo	Valor relativo R_e (%)	Fluido de trabajo	Valor relativo R_e (%)	Fluido de trabajo	Valor relativo I (%)
Acetona-NPentano	100,0	Isopentano	100,0	Metanol	100,0	Isopentano	100,0
Isopentano	100,6	Acetona-NPentano	106,3	N-Hexano	100,0	N-Pentano	117,2
N-Hexano	105,1	Dietil Éter-Formiato de Metilo	116,6	Acetona-NPentano	101,1	R-365	185,3
Dietil Éter-Formiato de Metilo	106,6	Agua	117,4	Agua	102,8	Dietil Éter-Formiato de Metilo	198,7
R-141b	106,7	Dietil Éter	117,8	R-141b	103,2	N-Hexano	218,7
Agua	107,3	R-365	118,3	Isopentano	103,9	Dietil Éter	230,2
R-365	107,4	N-Pentano	121,3	Ciclopentano-Metanol	104,8	Acetona-NPentano	230,7
Dietil Éter	108,5	R-141b	139,8	Dietil Éter-Formiato de Metilo	107,5	R-141b	243,9
N-Pentano	108,7	Ciclopentano-Metanol	141,8	Acetona	107,8	Ciclopentano	253,8
Acetona	113,1	N-Hexano	147,8	R-365	108,2	FC-84	422,7
Metanol	114,9	Acetona	150,9	Dietil Éter	109,4	Acetona	423,0
Ciclopentano	118,2	FC-84	157,4	N-Pentano	109,8	Metanol	472,8
Ciclopentano-Metanol	121,6	Ciclopentano	163,1	Ciclopentano	113,0	Agua	962,6
FC-84	123,1	Metanol	204,4	FC-84	118,7	Ciclopentano-Metanol	2523,9

Tabla 9-1 Puesta en orden según los diferentes parámetros de comparación de los ensayos con los diferentes fluidos de trabajo empleados. Se han utilizado los ensayos con carga del 90%, 150 W, en posición vertical y la cámara climática a 43 °C. Al mejor fluido de trabajo (menor valor del parámetro de comparación) se le ha dado el valor de 100 y al resto un valor proporcional.

- **Dependencia del comportamiento del termosifón cilíndrico con la carga de fluido de trabajo:** No se ha encontrado una relación directa entre la carga del fluido de trabajo y el comportamiento global del termosifón. Para algunos fluidos de trabajo el termosifón ha ofrecido menor resistencia térmica global al aumentar la carga de fluido de trabajo, y para otros ha ocurrido a la inversa (ver Tabla 9-2).

En cambio, si se ha apreciado una tendencia a empeorar el comportamiento del termosifón en el evaporador al aumentar la carga de fluido de trabajo. Para diez fluidos de trabajo, la resistencia térmica en el evaporador aumenta con el incremento de la carga; en cambio sólo para tres fluidos de trabajo ocurre a la inversa (ver Tabla 9-2).

En la zona del condensador, al contrario que en el evaporador, se aprecia una tendencia de mejora del comportamiento con el aumento de la carga de fluido de trabajo. Con diez fluidos de trabajo, la resistencia térmica en el evaporador disminuye con el incremento de la carga; sólo para tres fluidos de trabajo ocurre a la inversa (ver Tabla 9-2).

Finalmente, centrándose en la isotermicidad del prototipo, no se ha encontrado una dependencia significativa con la carga de fluido de trabajo. Para algunos fluidos de trabajo el termosifón ha ofrecido menor resistencia térmica global al aumentar la carga de fluido de trabajo, y para otros ha ocurrido a la inversa (ver Tabla 9-2).

Fluido de trabajo	Variación R_g (%)	Variación R_e (%)	Variación R_c (%)	Variación I (%)
Acetona	-1,72	0,13	-2,44	9,14
Acetona-NPentano	-4,07	4,09	-4,33	0,29
Agua	0,84	37,80	-6,41	53,40
Ciclopentano	1,97	8,40	0,68	-11,24
Ciclopentano-Metanol	5,94	-4,49	-5,26	-4,70
Dietil Éter	0,15	2,86	-0,01	-18,94
Dietil Éter-Formiato de Metilo	0,25	-3,02	1,11	-12,68
FC-84	6,23	21,68	4,31	-27,13
Isopentano	-4,07	-8,64	-3,27	0,00
Metanol	-3,25	34,35	-12,09	-6,92
N-Hexano	-13,50	1,15	-1,82	-92,22
N-Pentano	-1,15	4,05	-2,11	-1,76
R-141b	-5,35	0,09	-6,63	-1,85
R-365	5,08	-3,46	7,06	-5,12

Tabla 9-2 Variación de los parámetros de comparación con respecto a la carga de fluido de trabajo. Se han comparado los valores de los parámetros de las cargas de 90% frente a las de 50% en las condiciones de 150 W, posición vertical y 43 °C de la cámara climática (se han considerado como las condiciones más estables del termosifón). Un valor positivo (color rojo) de las variaciones significa que a carga del 90% el parámetro de comparación es mayor que al 50%.

- **Dependencia del comportamiento del termosifón cilíndrico con la temperatura de la cámara climática:** Para los parámetros de comparación resistencia térmica global, resistencia térmica en el evaporador e isotermicidad, independientemente de la carga,

inclinación y fluido de trabajo, al aumentar la temperatura de la cámara climática ha disminuido su valor. En la Tabla 9-3 se muestran los resultados numéricos para las condiciones de carga al 90%, 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

Para la resistencia térmica en el condensador esta tendencia no ha sido tan clara, en algunas condiciones su valor ha disminuido con la temperatura y en otros ha aumentado; lo cual significa que no es tan sensible a la variación de la temperatura.

Fluido de trabajo	Variación R_g (%)	Variación R_e (%)	Variación R_c (%)	Variación I (%)
Acetona	-14,9	-41,0	-3,4	-36,6
Acetona-NPentano	-3,4	-22,7	1,3	-0,3
Agua	-10,0	-27,7	-3,6	-28,3
Ciclopentano	-7,2	-30,9	5,8	-71,3
Ciclopentano-Metanol	-7,1	-28,5	43,5	-64,9
Dietil Éter	-3,3	-13,9	-1,1	7,0
Dietil Éter-Formiato de Metilo	-5,2	-27,0	1,0	-23,9
FC-84	-7,8	-29,2	17,0	-86,1
Isopentano	-4,1	-26,1	1,5	-42,7
Metanol	-6,6	-15,9	-2,0	-21,3
N-Hexano	-10,6	-36,0	0,0	-21,2
N-Pentano	-1,6	-12,5	0,9	-3,9
R-141b	-8,1	-33,5	2,1	-37,2
R-365	-5,1	-24,1	-0,5	9,4

Tabla 9-3 Variación de los parámetros de comparación con respecto a la temperatura en la cámara climática. Se han comparado los valores de los parámetros a la temperatura de 43 °C frente a la temperatura de 10°C en las condiciones de carga del 90%, 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical (condiciones más estables del termosifón).

- **Dependencia del comportamiento del termosifón cilíndrico con el flujo de calor:** El termosifón se ha comportado significativamente mejor al aumentar el flujo de calor tanto globalmente como en el evaporador, en el condensador y en la isothermicidad. Esto ha ocurrido además, independientemente de la carga y de la temperatura de la cámara climática. Para las condiciones del 90% de carga y 43 °C de la cámara climática, en la Tabla 9-4 se han indicado los valores numéricos.

Fluido de trabajo	Variación R_g (%)	Variación R_e (%)	Variación R_c (%)	Variación I (%)
N-Hexano	-32,5	-67,2	-5,3	-65,6
R-141b	-22,8	-59,5	-2,0	-35,8

Tabla 9-4 Variación de los parámetros de comparación con respecto a el flujo de calor. Se ha comparado los valores de los parámetros a 200 W frente a 75 W en las condiciones de carga a 90%, posición vertical y la cámara climática a 43 °C (condiciones más estables).

También se ha observado cómo la variación es mayor en el evaporador que en el condensador. Es decir, la resistencia térmica en el evaporador no es tan sensible a los cambios del flujo de calor como la resistencia térmica en el condensador.

- **Dependencia del comportamiento del termosifón cilíndrico con la inclinación:** El termosifón se ha comportado peor al trabajar con inclinación globalmente, en el condensador y en la isothermicidad. Pero hay que señalar que en la zona del evaporador la inclinación ha mejorado la transmisión del calor, siendo menor la resistencia térmica en el evaporador estando al trabajar el termosifón con inclinación (ver Tabla 9-5).

Fluido de trabajo	Variación R_g (%)	Variación R_e (%)	Variación R_c (%)	Variación I (%)
N-Hexano	7,1	-18,2	12,4	95,9
R-141b	4,4	-19,6	9,9	20,3

Tabla 9-5 Variación de los parámetros de comparación con respecto a la inclinación. Se ha comparado los valores de los parámetros a 60° frente a la posición vertical en las condiciones de carga a 90%, 150 W y la cámara climática a 43 °C (condiciones más estables). Los valores positivos muestran mayor valor de los parámetros para el termosifón con inclinación de 60°.

- **Dependencia del comportamiento del termosifón cilíndrico con las propiedades de los fluidos de trabajo:** El aumento de la presión en el interior del termosifón, tiende a mejorar el comportamiento del mismo. Con el aumento de la presión baja el valor de todas los parámetros de comparación, aunque en el condensador esta disminución es menos pronunciada.

Respecto al resto de propiedades analizadas, cabe mencionar el peor comportamiento del termosifón con el aumento de la entalpía molar de vaporización y la mejora de comportamiento con el aumento de la entalpía másica de vaporización, densidad del líquido, calor específico del líquido y la masa molecular.

- **Repetitividad de los ensayos con el termosifón cilíndrico:** Se ha apreciado una buena repetitividad de los ensayos para la carga del 90%. Para las cargas del 50% y 70% la repetitividad ha sido peor.
- **Comparación del comportamiento entre el termosifón cilíndrico y el termosifón prismático:** La primera cuestión y más evidente es la menor resistencia térmica global que ofrece el termosifón cilíndrico en comparación con el termosifón prismático. Esto se deberá en parte al mayor flujo de calor con el que se ha hecho trabajar al termosifón cilíndrico.

El siguiente aspecto, y también muy evidente, es la mayor sensibilidad del valor de la resistencia térmica global del termosifón prismático a los cambios de temperatura de la cámara climática, de carga de fluido de trabajo o de fluido de trabajo empleado.

Finalmente, se ha apreciado un orden en el comportamiento según el fluido de trabajo empleado entre los dos termosifones en los ensayos con carga baja; en los ensayos con carga media o alta, esta relación no se ha mantenido con tanta claridad (ver Tabla 9-6 y Tabla 9-7).

Termosifón cilíndrico				Termosifón prismático			
Sustancia	Carga	\bar{T}_{amb} (°C)	R_g (°C/W)	Sustancia	Carga	\bar{T}_{amb} (°C)	R_g (°C/W)
Acetona-NPentano	50%	42,49	0,299	Acetona-Npentano	1 ^a	43,89	0,346
Acetona-NPentano	50%	10,11	0,302	N-Pentano	1 ^a	43,76	0,351
Acetona-NPentano	50%	31,44	0,303	Acetona-Npentano	1 ^a	33,18	0,352
Dietil Éter-Formiato de Metilo	50%	43,28	0,305	Acetona-Npentano	1 ^a	26,38	0,366
Dietil Éter-Formiato de Metilo	50%	32,61	0,308	N-Pentano	1 ^a	32,98	0,367
Dietil Éter-Formiato de Metilo	50%	25,73	0,309	Dietil Éter-Formiato de Metilo	1 ^a	33,55	0,370
Dietil Éter	50%	42,69	0,311	Dietil Éter-Formiato de Metilo	1 ^a	44,14	0,372
Acetona-NPentano	50%	24,59	0,312	R-141b	1 ^a	43,43	0,373
N-Pentano	50%	42,79	0,315	Dietil Éter-Formiato de Metilo	1 ^a	26,68	0,378
Dietil Éter	50%	31,72	0,317	Ciclopentano-Metanol	1 ^a	43,96	0,385
N-Pentano	50%	10,40	0,319	R-141b	1 ^a	32,66	0,387
N-Pentano	50%	31,80	0,320	Dietil Éter	1 ^a	33,13	0,390
Dietil Éter	50%	24,90	0,322	Dietil Éter	1 ^a	43,89	0,393
Dietil Éter-Formiato de Metilo	50%	11,37	0,322	N-Pentano	1 ^a	26,30	0,397
R-141b	50%	43,13	0,323	Dietil Éter-Formiato de Metilo	1 ^a	11,17	0,400
N-Pentano	50%	25,00	0,324	Ciclopentano-Metanol	1 ^a	26,55	0,406
R-141b	50%	32,43	0,329	Acetona-NPentano	1 ^a	10,87	0,408
Ciclopentano-Metanol	50%	43,24	0,329	Dietil Éter	1 ^a	26,40	0,417
Dietil Éter	50%	10,47	0,332	Ciclopentano-Metanol	1 ^a	33,26	0,418
Ciclopentano-Metanol	50%	32,39	0,332	R-141b	1 ^a	25,93	0,418
R-141b	50%	25,79	0,334	N-Pentano	1 ^a	10,89	0,443
Ciclopentano-Metanol	50%	25,51	0,335	Dietil Éter	1 ^a	11,37	0,461
Ciclopentano-Metanol	50%	11,24	0,343	Ciclopentano-Metanol	1 ^a	11,11	0,464
R-141b	50%	11,51	0,350	R-141b	1 ^a	10,79	0,473

Tabla 9-6 Clasificación de los resultados con los termosifones cilíndrico y prismático SCP con carga baja.

Termosifón cilíndrico				Termosifón prismático			
Sustancia	Carga	\bar{T}_{amb} (°C)	Rg (°C/W)	Sustancia	Carga	\bar{T}_{amb} (°C)	Rg (°C/W)
Dietil Éter	50%	42,69	0,311	Dietil Éter	1 ^a	43,65	0,464
N-Pentano	50%	42,79	0,315	N-Pentano	1 ^a	43,40	0,467
Dietil Éter	50%	31,72	0,317	N-Pentano	1 ^a	32,59	0,483
N-Pentano	50%	10,40	0,319	Dietil Éter	1 ^a	32,77	0,484
N-Pentano	50%	31,80	0,320	R-141b	1 ^a	34,27	0,496
Dietil Éter	50%	24,90	0,322	N-Pentano	1 ^a	25,54	0,497
R-141b	50%	43,13	0,323	R-141b	1 ^a	43,61	0,500
N-Pentano	50%	25,00	0,324	Dietil Éter	1 ^a	25,88	0,507
R-141b	50%	32,43	0,329	N-Pentano	1 ^a	10,80	0,508
Dietil Éter	50%	10,47	0,332	Dietil Éter	1 ^a	11,32	0,525
R-141b	50%	25,79	0,334	R-141b	1 ^a	26,18	0,525
R-141b	50%	11,51	0,350	R-141b	1 ^a	11,00	0,560

Tabla 9-7 Clasificación de los resultados con los termosifones cilíndrico y prismático CCP con carga baja.

9.2 CONCLUSIONES FINALES

De los ensayos realizados en este estudio se puede concluir que el fluido empleado determina el rendimiento de los termosifones. Además, los fluidos de trabajo deberán tener un punto de ebullición normal bajo o una alta volatilidad (alta presión en el interior del termosifón), una entalpía másica de vaporización alta, una densidad del líquido alta, un calor específico del líquido alto, una masa molecular alta y una entalpía molar de vaporización baja, para mejorar el rendimiento del termosifón.

Respecto a las condiciones de trabajo, también se han encontrado diferencias significativas en el comportamiento del termosifón. Las altas temperaturas de trabajo y los altos flujos de calor mejoran el rendimiento del termosifón. En cambio la inclinación empeora el rendimiento del termosifón. Finalmente, no se ha encontrado una relación entre la carga de fluido de trabajo y el comportamiento del termosifón; dependiendo de la sustancia empleada la carga aumenta o disminuye el rendimiento del termosifón.

10 BIBLIOGRAFÍA

10.1 LIBROS

- Amir Faghri, “Heat Pipe Science and Technology”. Ed. Taylor & Francis, 1995.
- G. P. Peterson, “An Introduction to Heat Pipes”.
- J. P. Holman, “Transferencia de Calor”. 8ª edición. Ed. McGrawHill, 1998.

10.2 ARTÍCULOS

- G. Y. Eastman, “The Heat Pipe”. Ed. Scientific American, 1968.
- B. S. Larkin, “An Experimental Study of the Two-phase Thermosiphon Tube”. Ed. CSME Transactions, 1971.
- Y. Lee and U. Mital, “A Two-phase Closed Thermosyphon”. Int. J. Heat Mass Transfer, 1972.
- B. Palm y R. Khodabandeh, “Choosing Working Fluid for Two-phase Thermosyphon Systems for Cooling of Electronics”. Ed. Asme, 2003.

Pamplona, 29 de Junio de 2010.



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación :

INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL MECÁNICO

Título del proyecto:

FUNCIONAMIENTO DE UN TERMOSIFÓN CILÍNDRICO
CON DISTINTOS FLUIDOS DE TRABAJO

ANEXO

Manuel José Arcís Tellería

Tutor: Juan José Aguas Alcalde

Pamplona, 29 de Junio de 2010

Índice

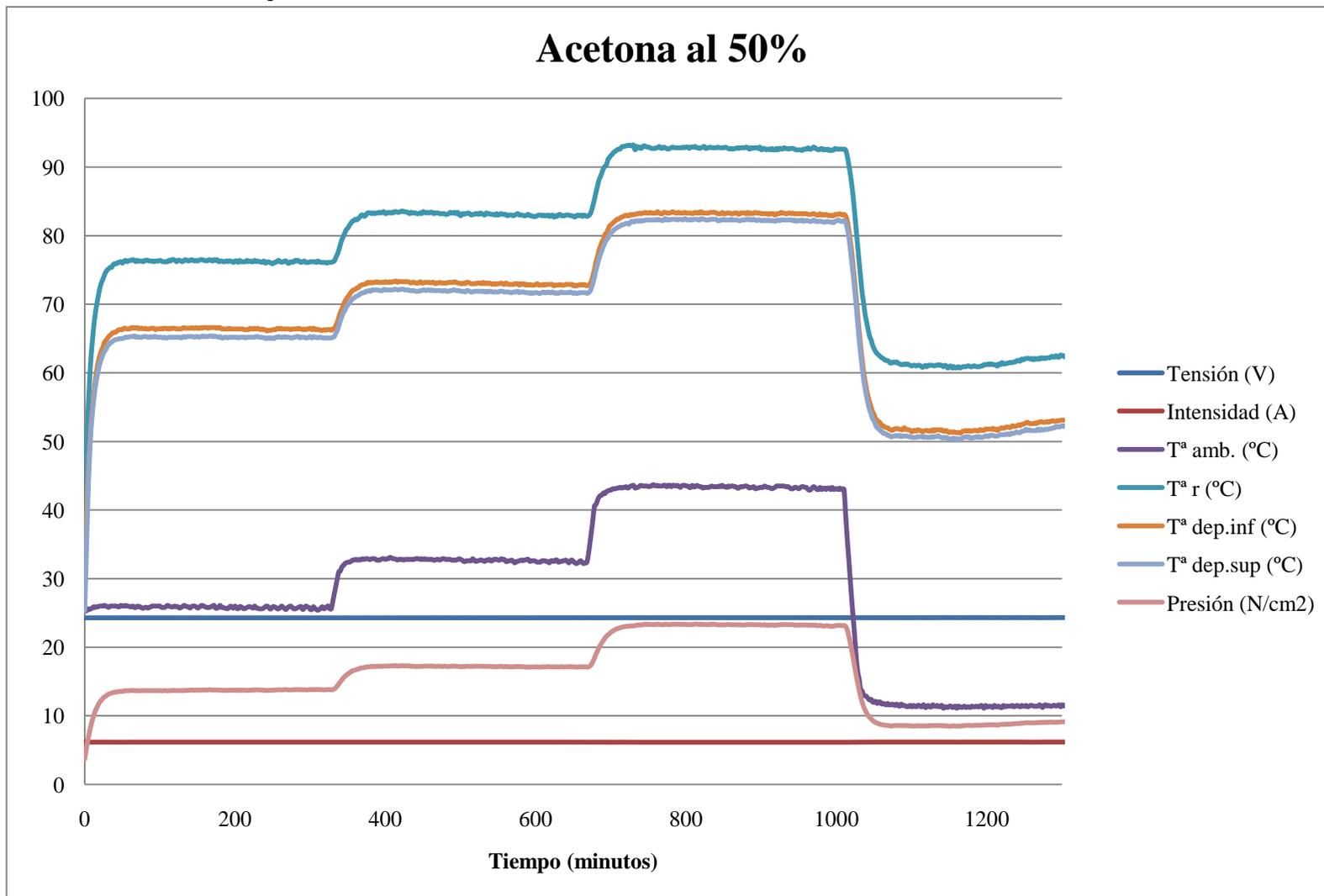
A. LECTURAS DE LAS SONDAS.....	1
A.1 Lecturas con fluido de trabajo Acetona.....	2
A.2 Lecturas con fluido de trabajo Acetona-NPentano.....	5
A.3 Lecturas con fluido de trabajo Agua.....	8
A.4 Lecturas con fluido de trabajo Ciclopentano.....	14
A.5 Lecturas con fluido de trabajo Ciclopentano-Metanol.....	17
A.6 Lecturas con fluido de trabajo Dietil Éter.....	20
A.7 Lecturas con fluido de trabajo Dietil Éter-Formiato de Metilo.....	23
A.8 Lecturas con fluido de trabajo FC-84.....	26
A.9 Lecturas con fluido de trabajo Formiato de Metilo.....	29
A.10 Lecturas con fluido de trabajo Isopentano.....	31
A.11 Lecturas con fluido de trabajo Metanol.....	34
A.12 Lecturas con fluido de trabajo N-Hexano.....	37
A.13 Lecturas con fluido de trabajo N-Pentano.....	47
A.14 Lecturas con fluido de trabajo R-141b.....	50
A.15 Lecturas con fluido de trabajo R-365-mfc.....	60

A. LECTURAS DE LAS SONDAS

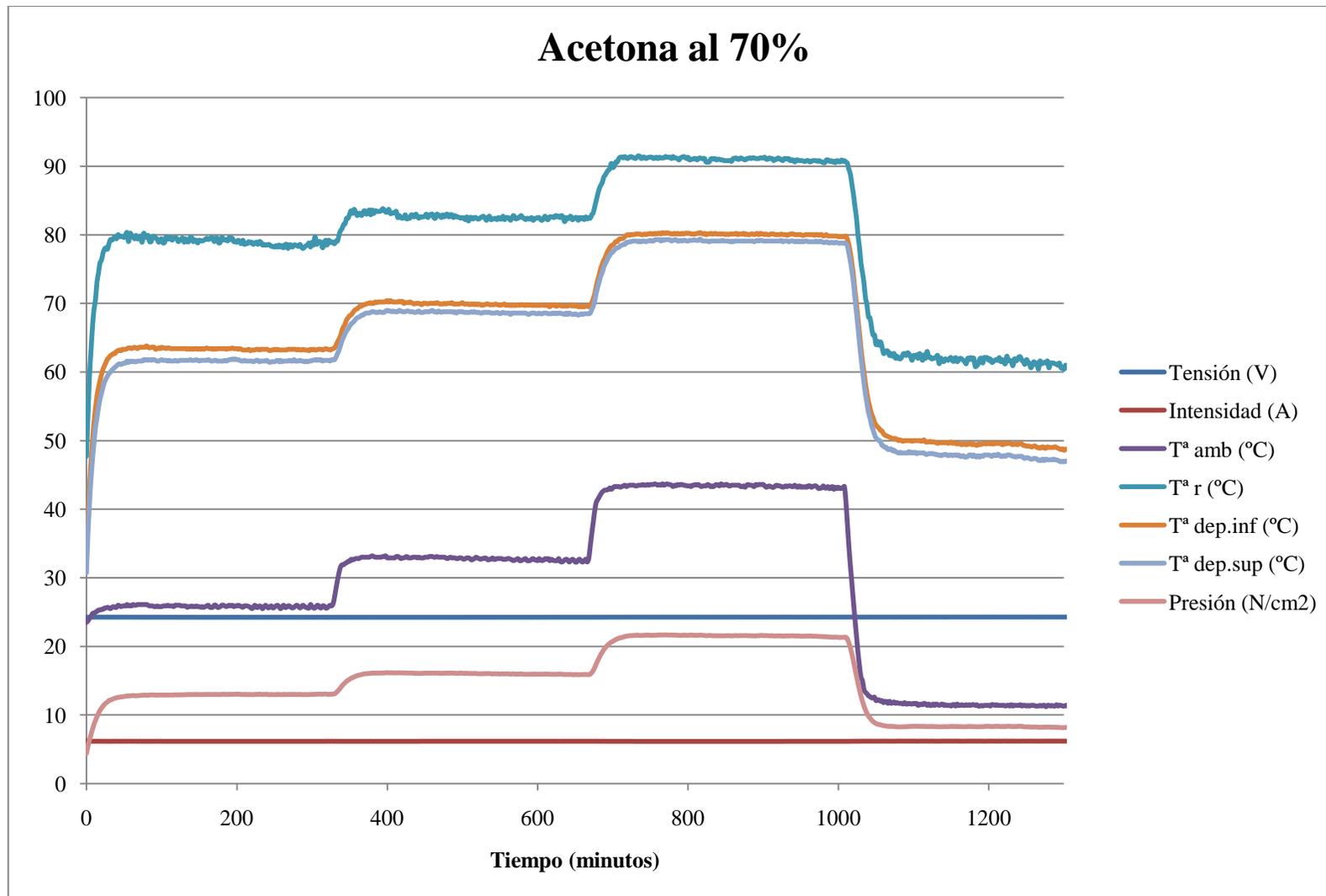
Finalmente se presentan las lecturas de las sondas de todos los ensayos realizados para este Proyecto Fin de Carrera. Las sondas que se presentan son:

- Sonda de tensión.
- Sonda de intensidad.
- Sonda de temperatura del interior de la cámara climática (T_{amb}).
- Sonda de temperatura del depósito inferior del termosifón ($T_{dep.inf}$).
- Sonda de temperatura del depósito superior del termosifón ($T_{dep.sup}$).
- Sensor de presión.

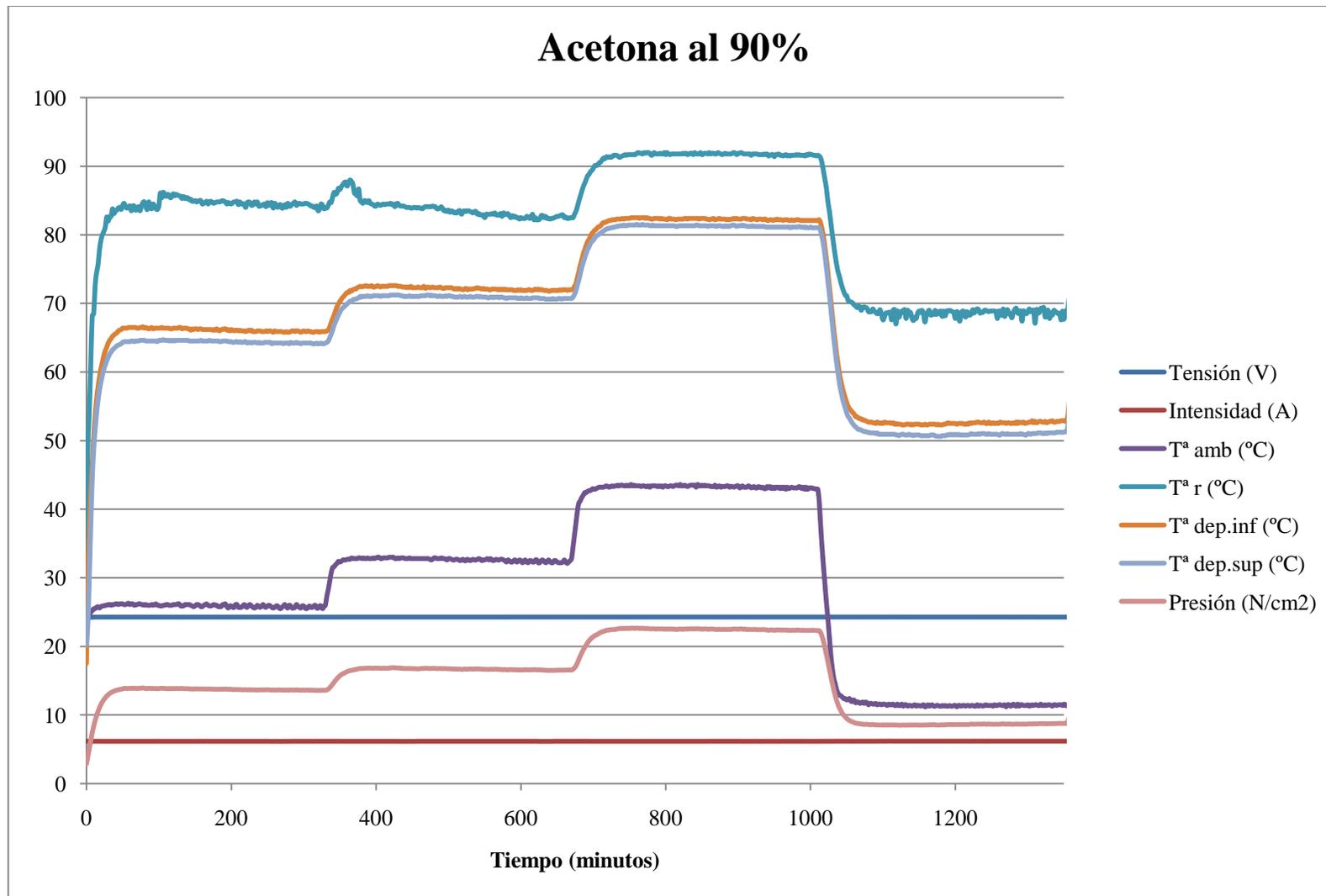
A.1 Lecturas con fluido de trabajo Acetona



Gráfica A.1-1 Lecturas de las sondas del ensayo con acetona al 50%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

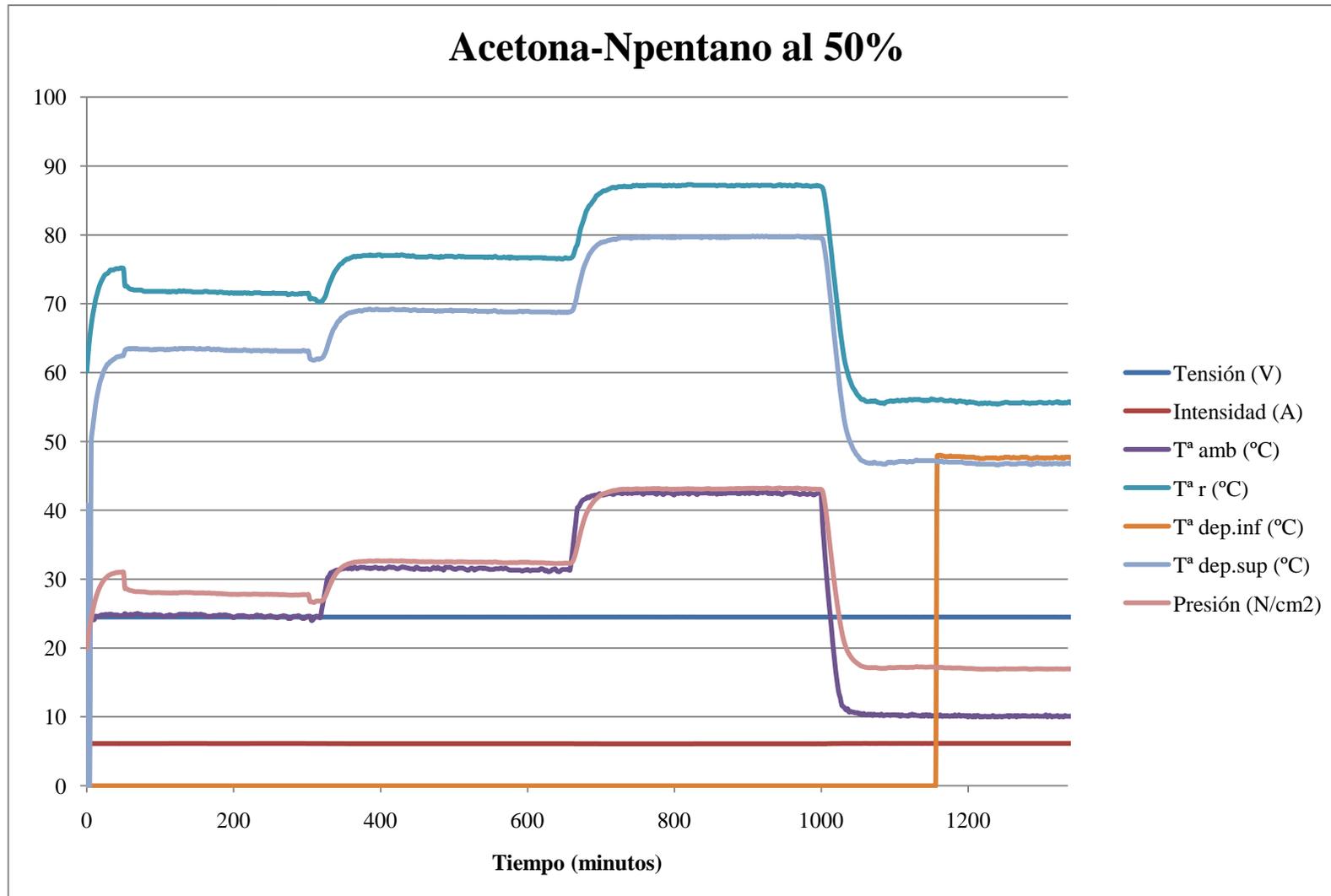


Gráfica A.1-2 Lecturas de las sondas del ensayo con acetona al 70%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

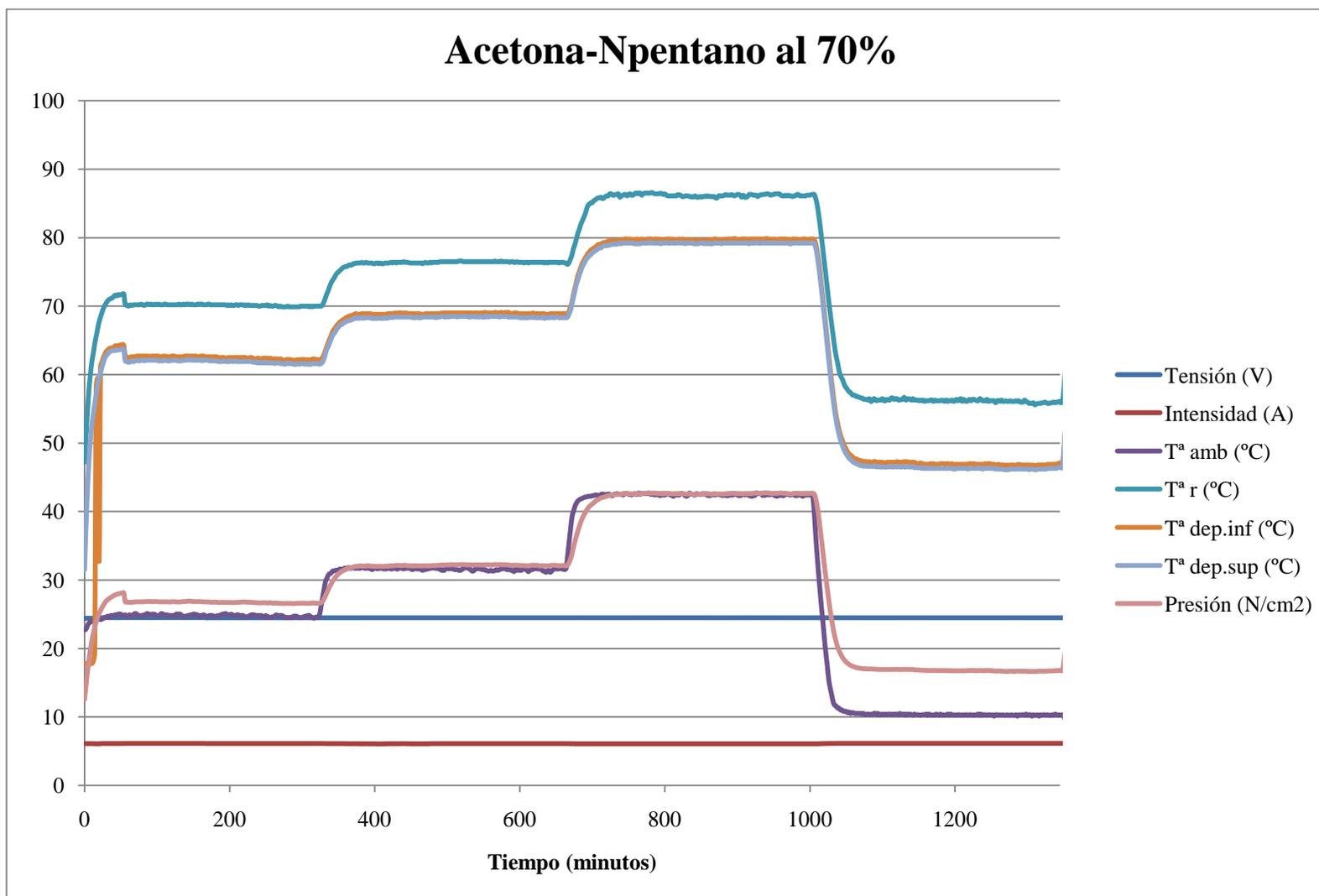


Gráfica A.1-3 Lecturas de las sondas del ensayo con acetona al 90%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

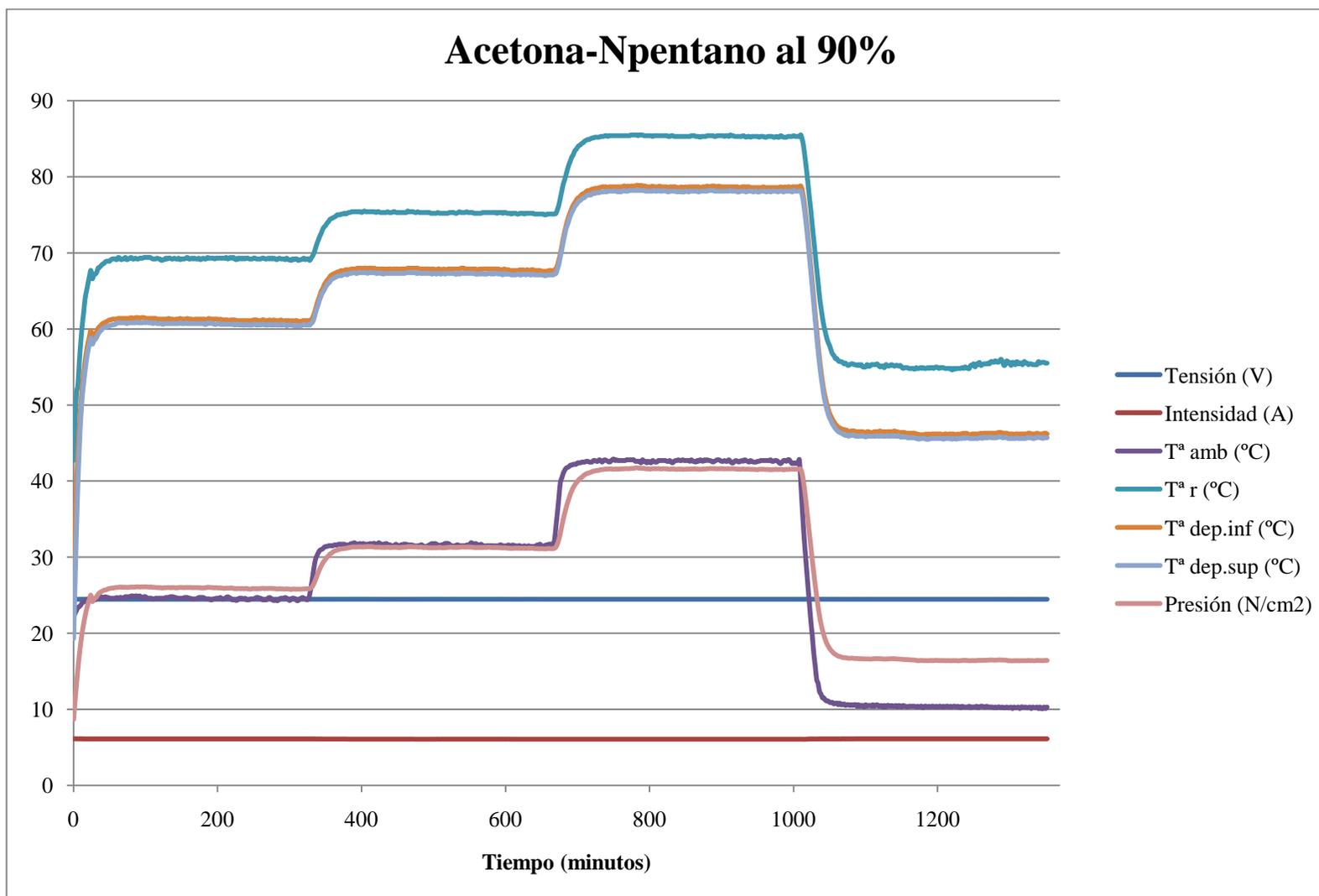
A.2 Lecturas con fluido de trabajo Acetona-NPentano



Gráfica A.2-1 Lecturas de las sondas del ensayo con acetona-Npentano al 50%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

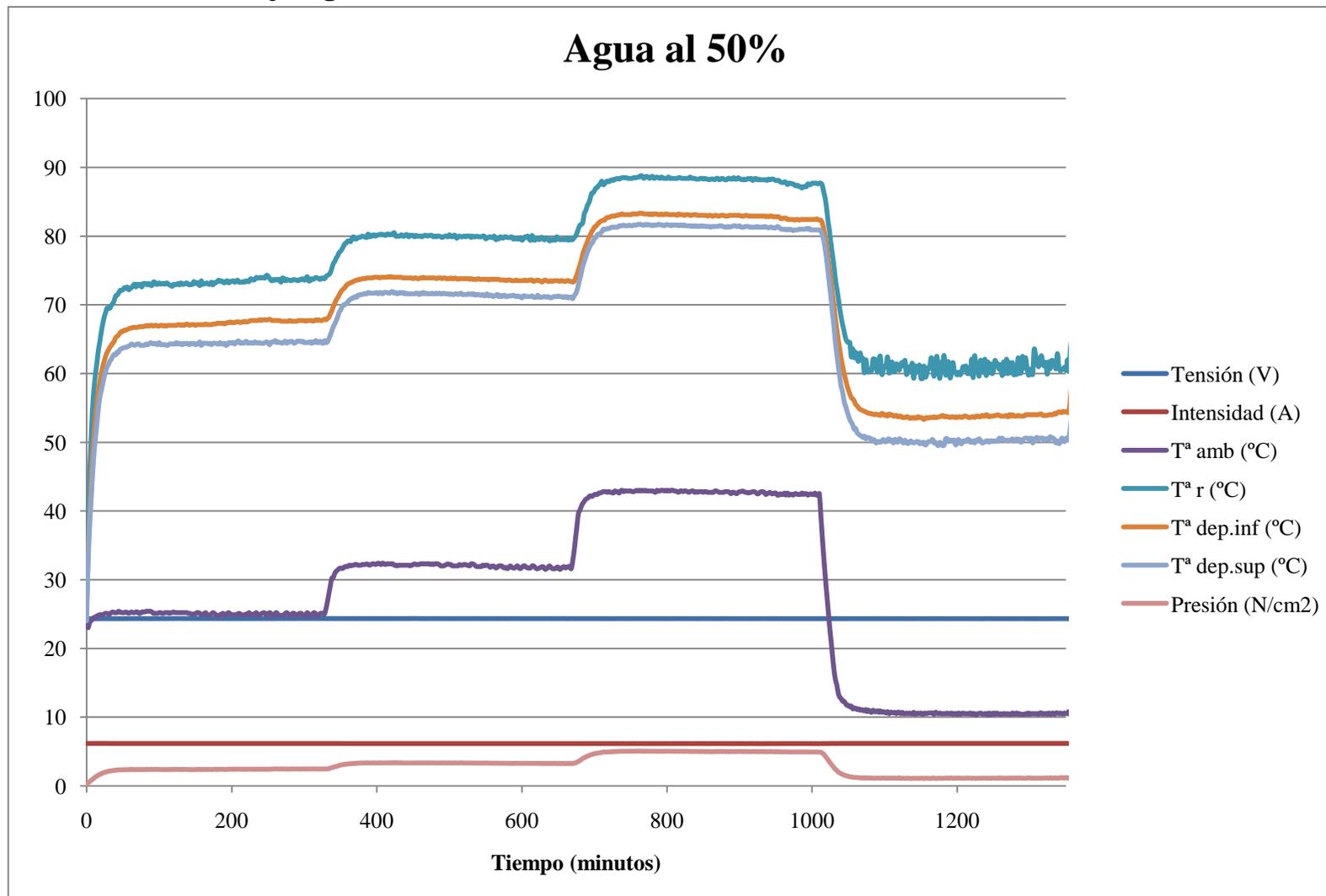


Gráfica A.2-2 Lecturas de las sondas del ensayo con acetona-Npentano al 70%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

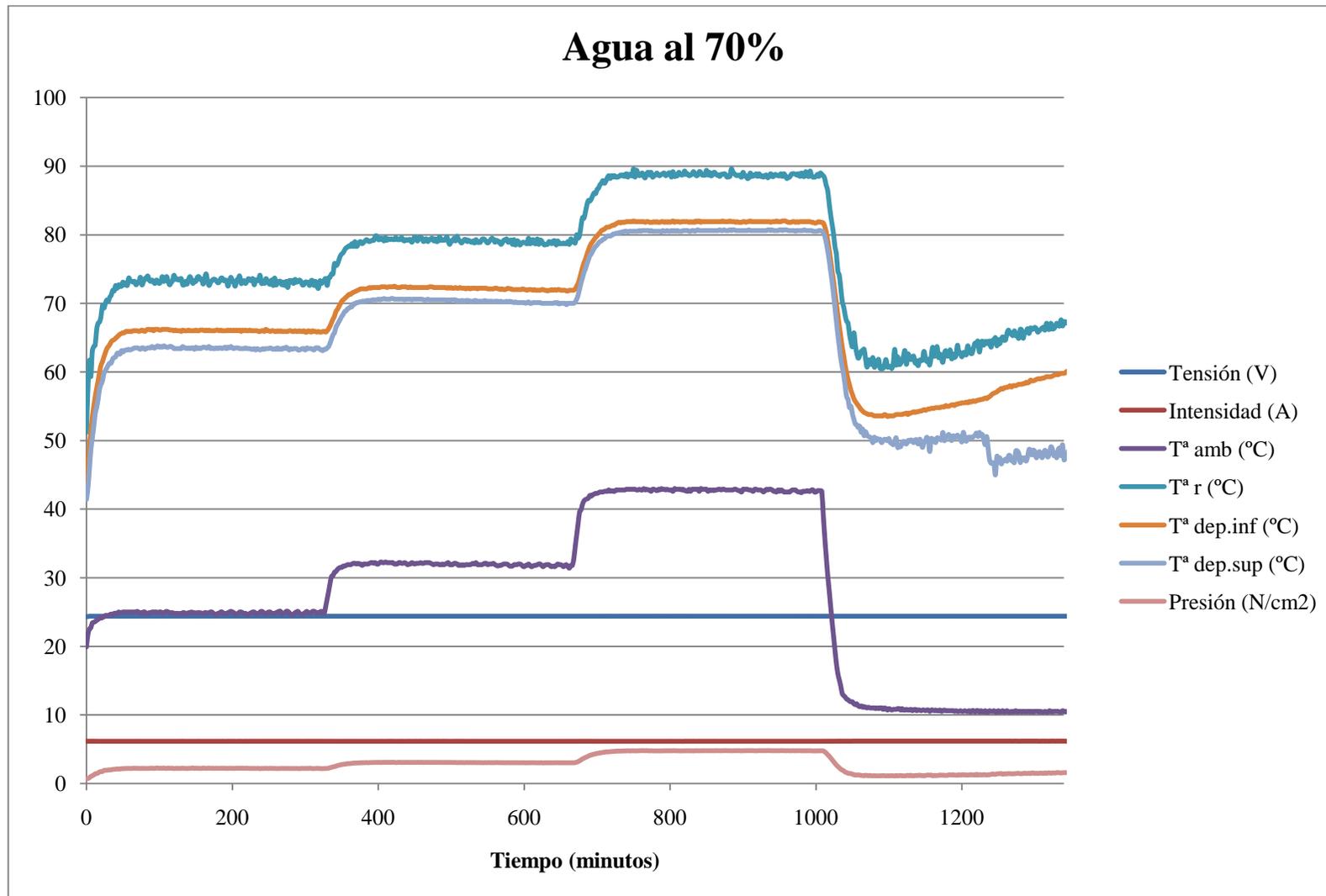


Gráfica A.2-3 Lecturas de las sondas del ensayo con acetona-Npentano al 90%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

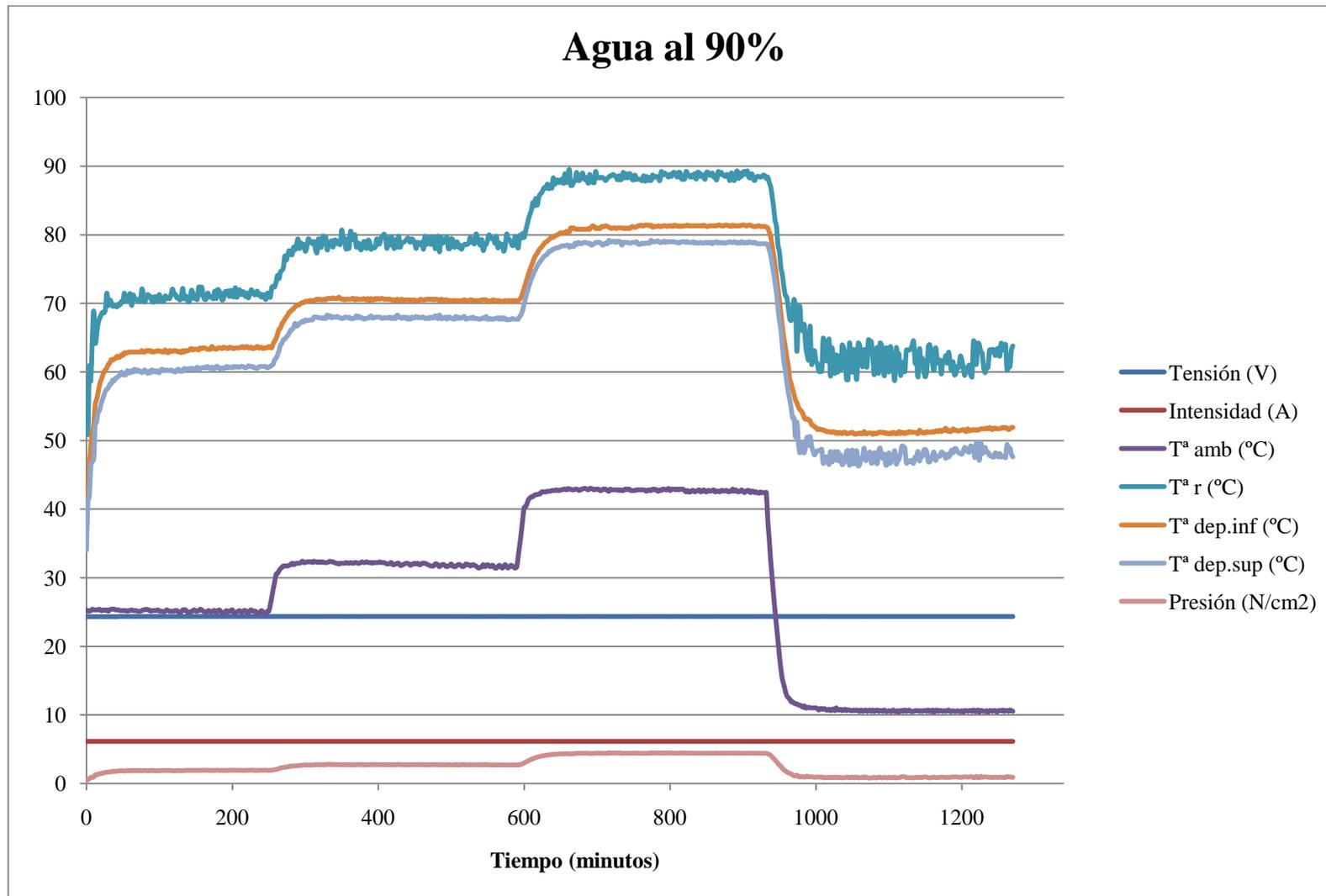
A.3 Lecturas con fluido de trabajo Agua



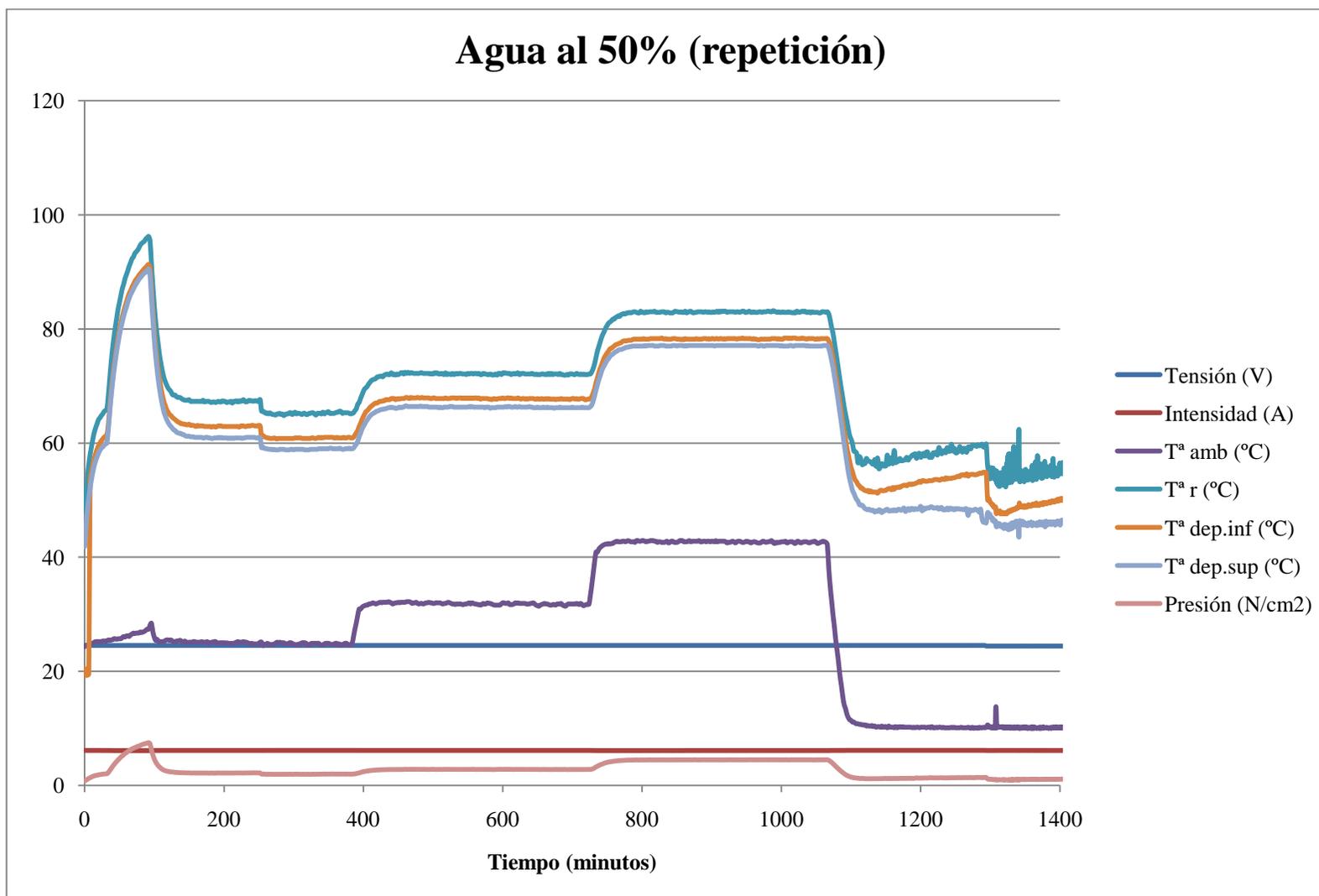
Gráfica A.3-1 Lecturas de las sondas del ensayo con agua al 50%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.



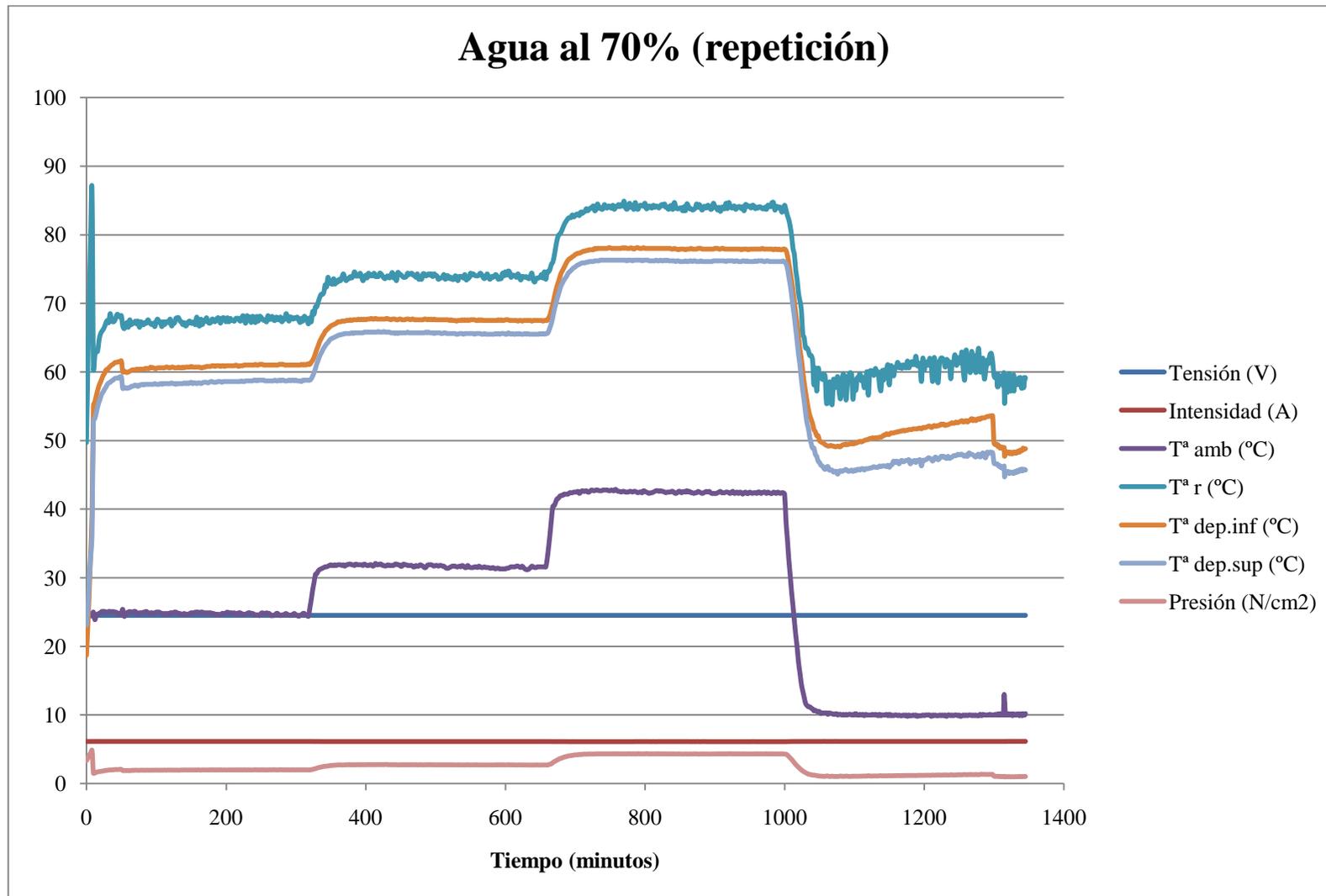
Gráfica A.3-2 Lecturas de las sondas del ensayo con agua al 70%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.



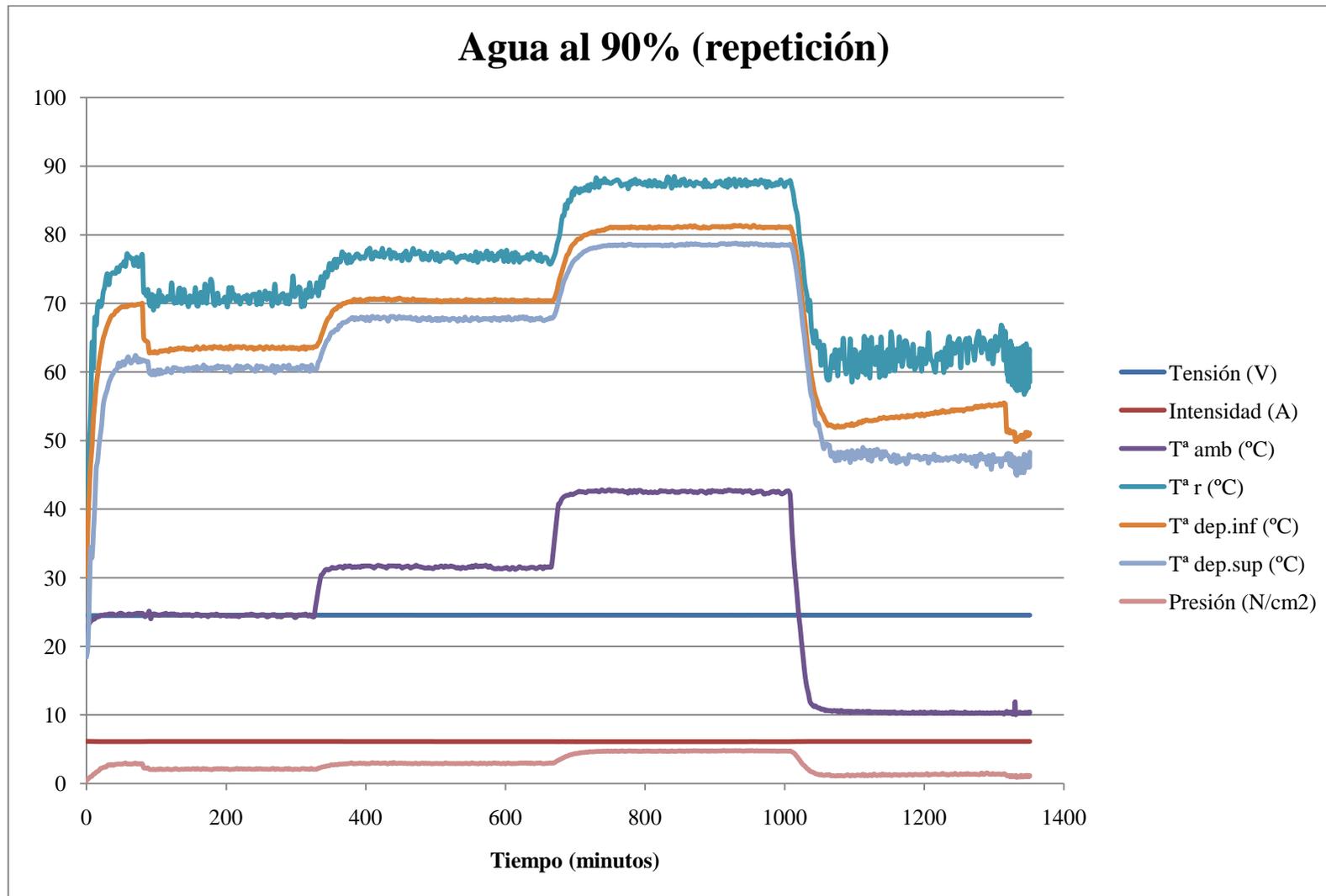
Gráfica A.3-3 Lecturas de las sondas del ensayo con agua al 90%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.



Gráfica A.3-4 Lecturas de las sondas del ensayo repetido con agua al 50%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

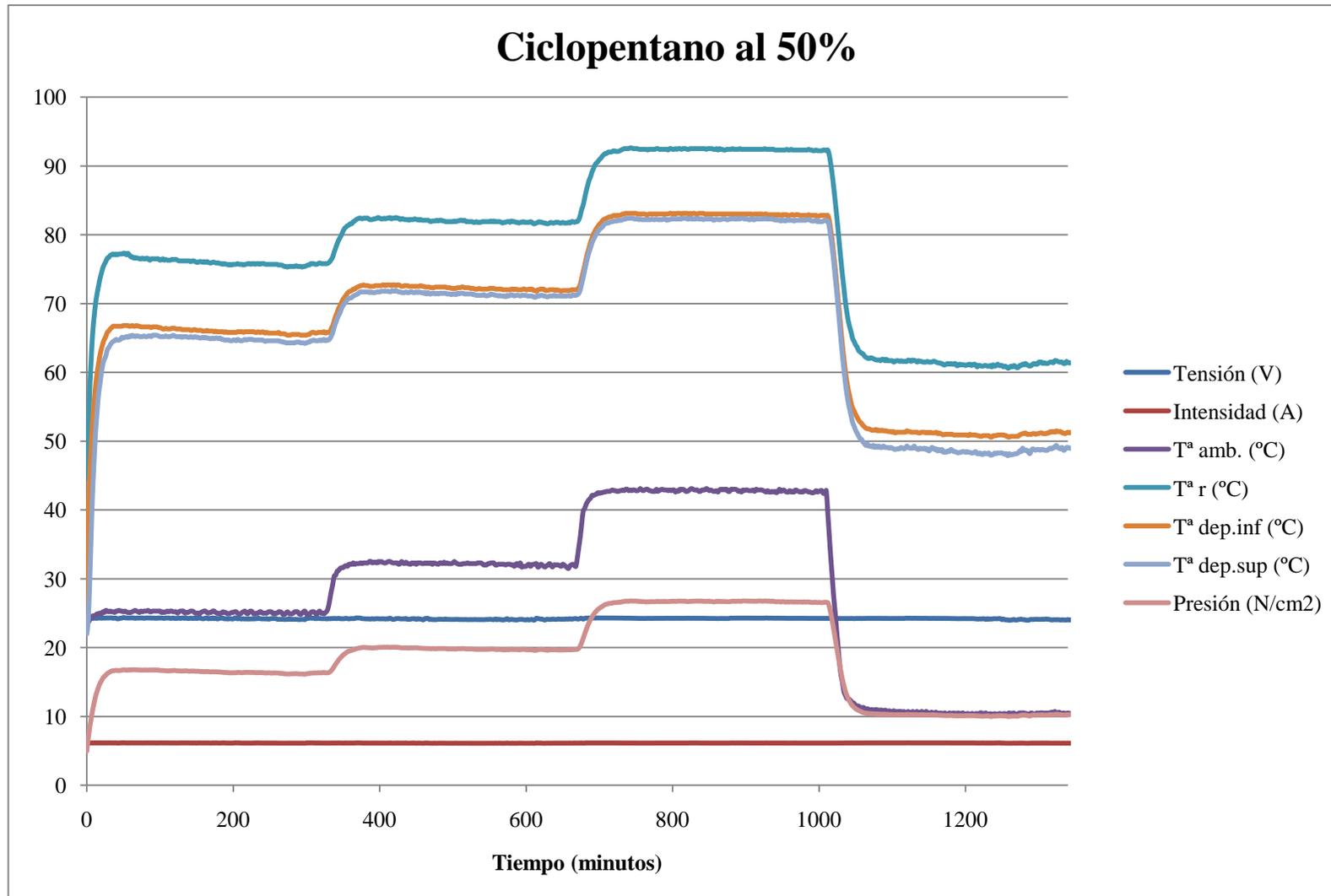


Gráfica A.3-5 Lecturas de las sondas del ensayo repetido con agua al 70%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

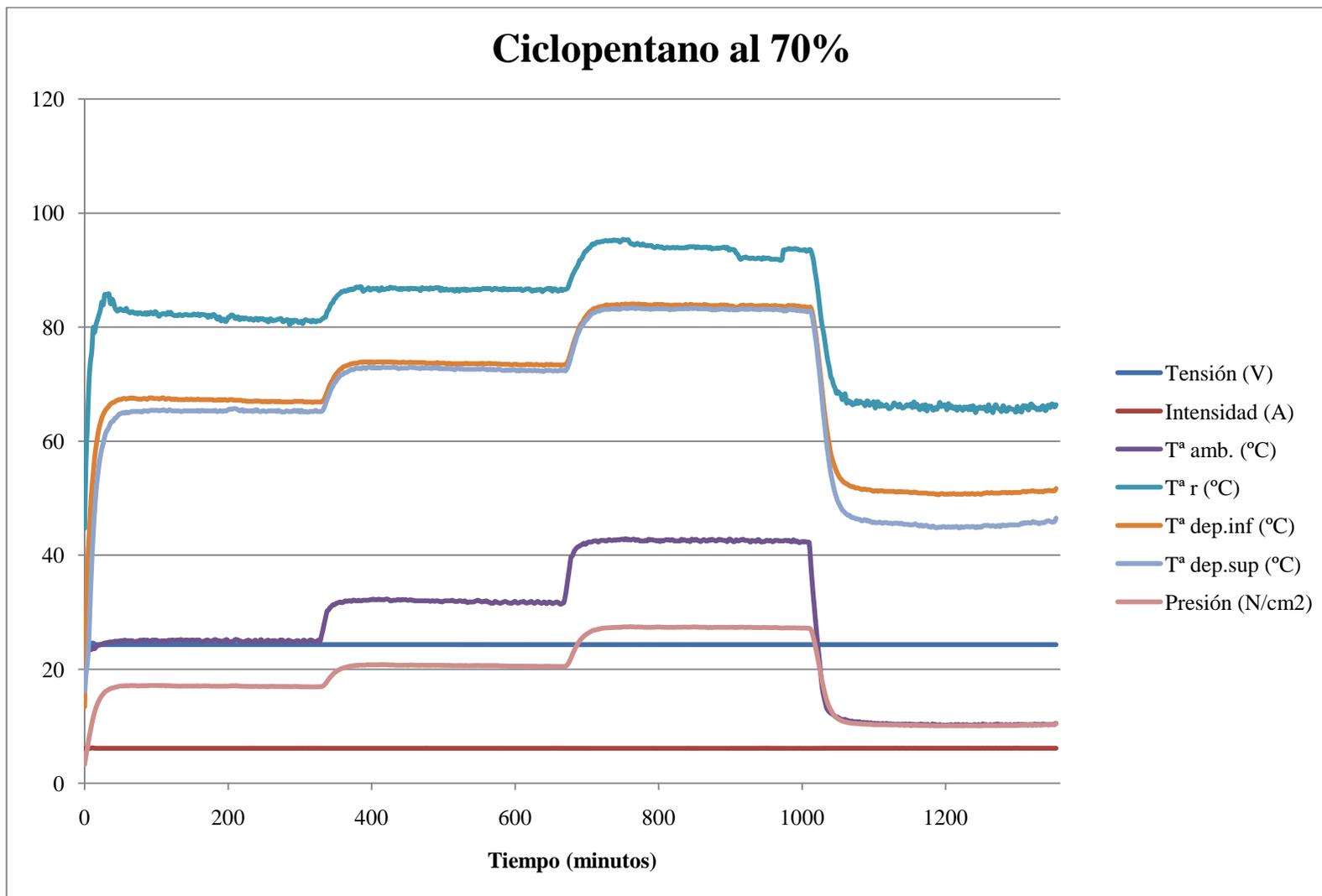


Gráfica A.3-6 Lecturas de las sondas del ensayo repetido con agua al 90%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

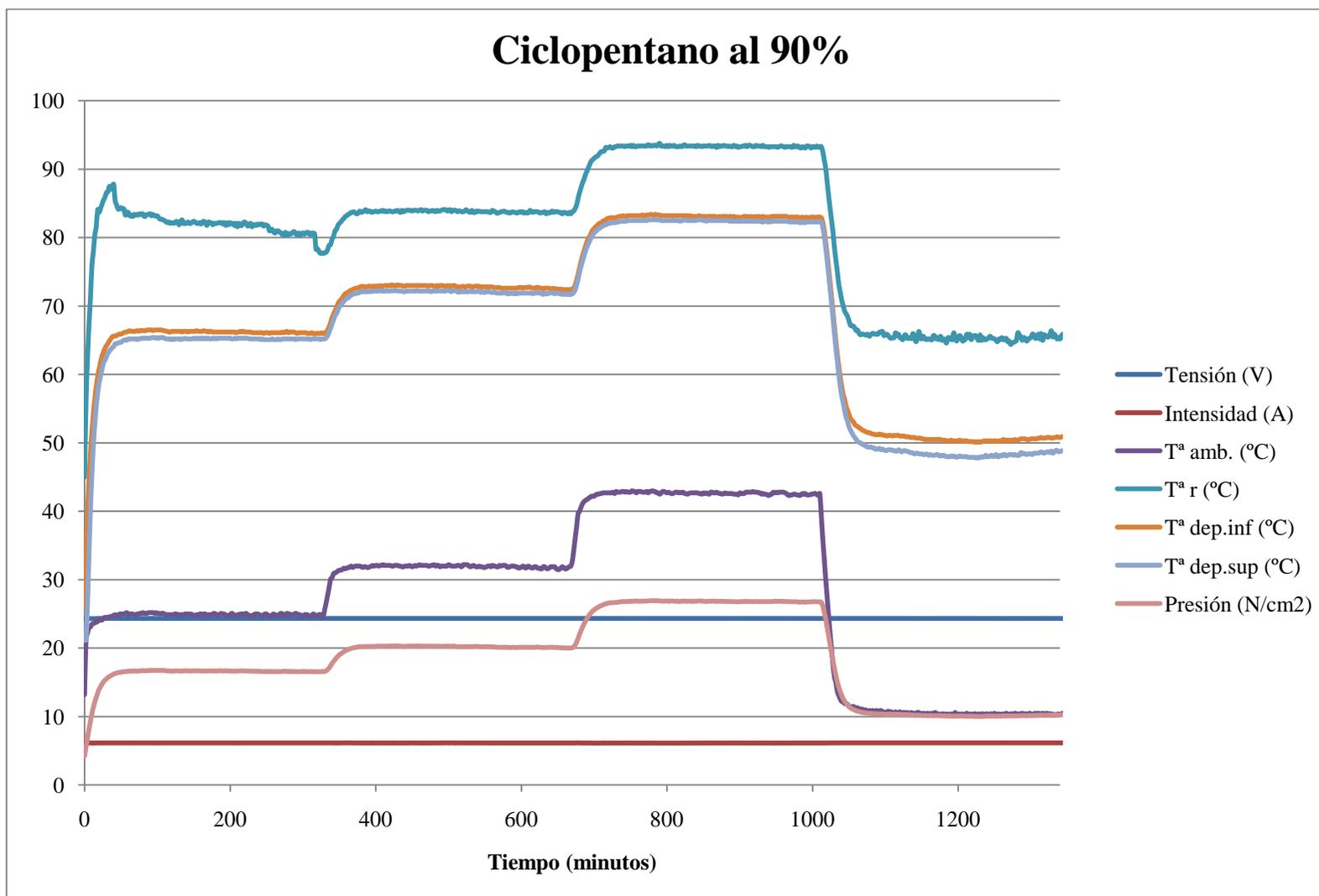
A.4 Lecturas con fluido de trabajo Ciclopentano



Gráfica A.4-1 Lecturas de las sondas del ensayo con ciclopentano al 50%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

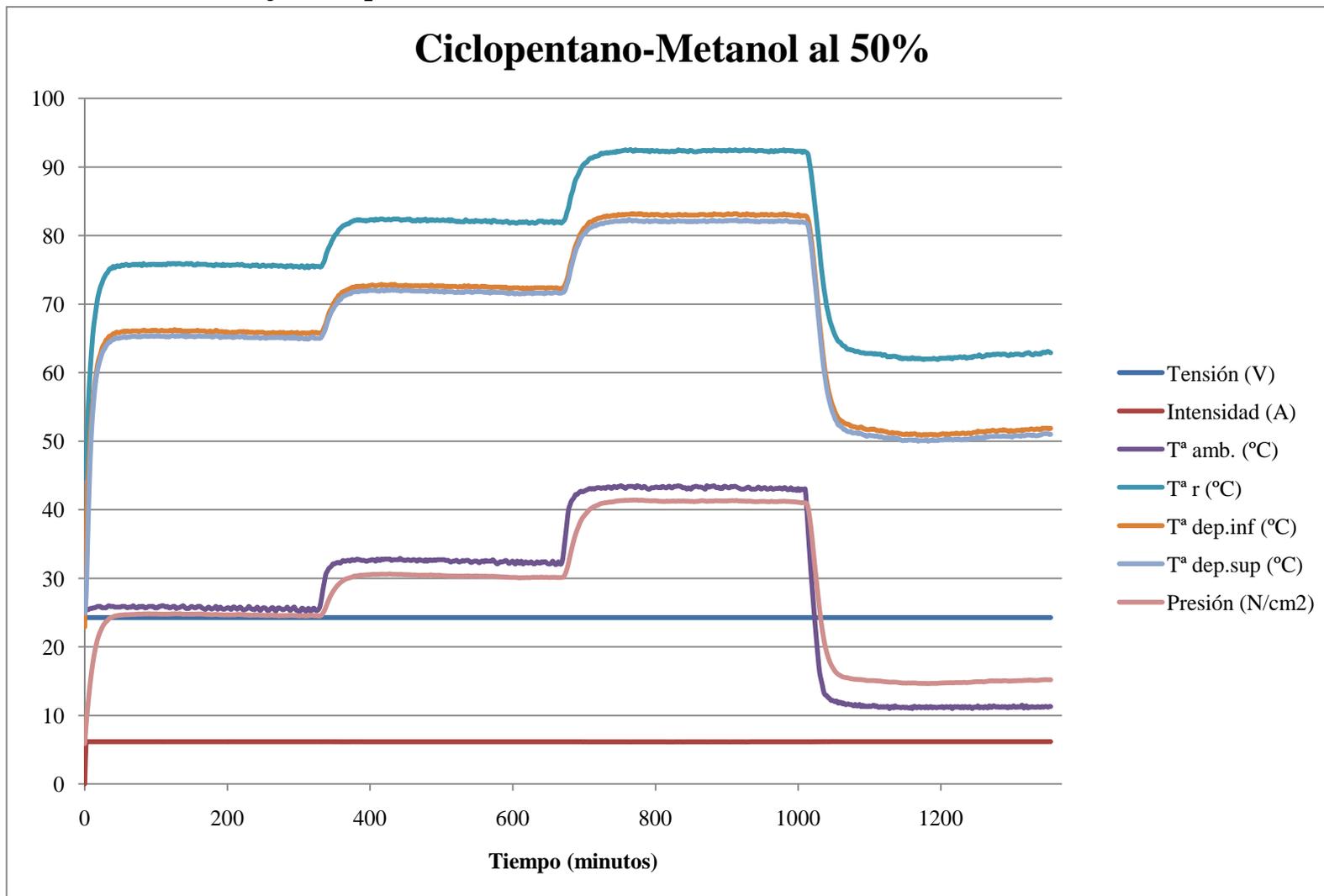


Gráfica A.4-2 Lecturas de las sondas del ensayo con ciclopentano al 70%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

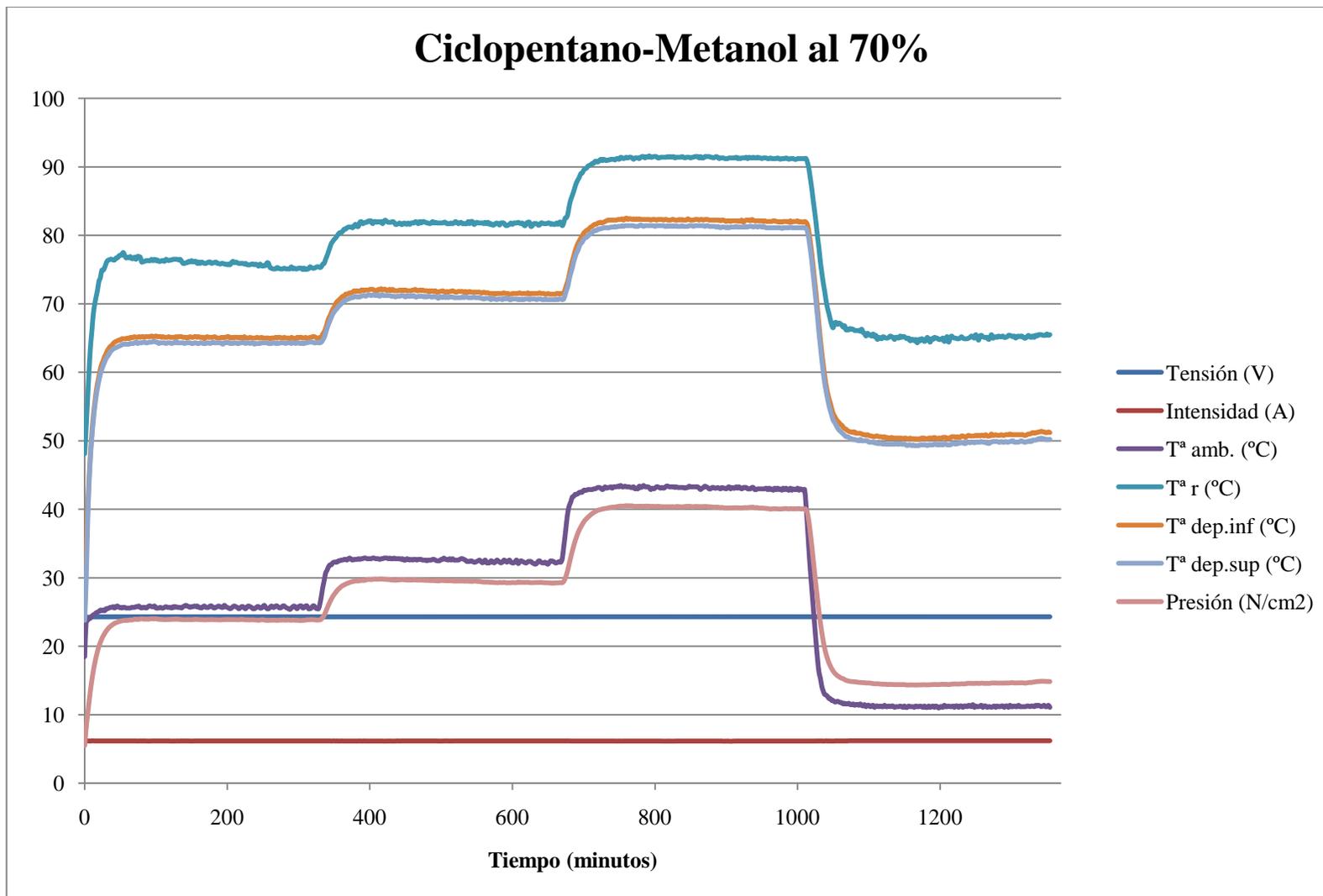


Gráfica A.4-3 Lecturas de las sondas del ensayo con ciclopentano al 90%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

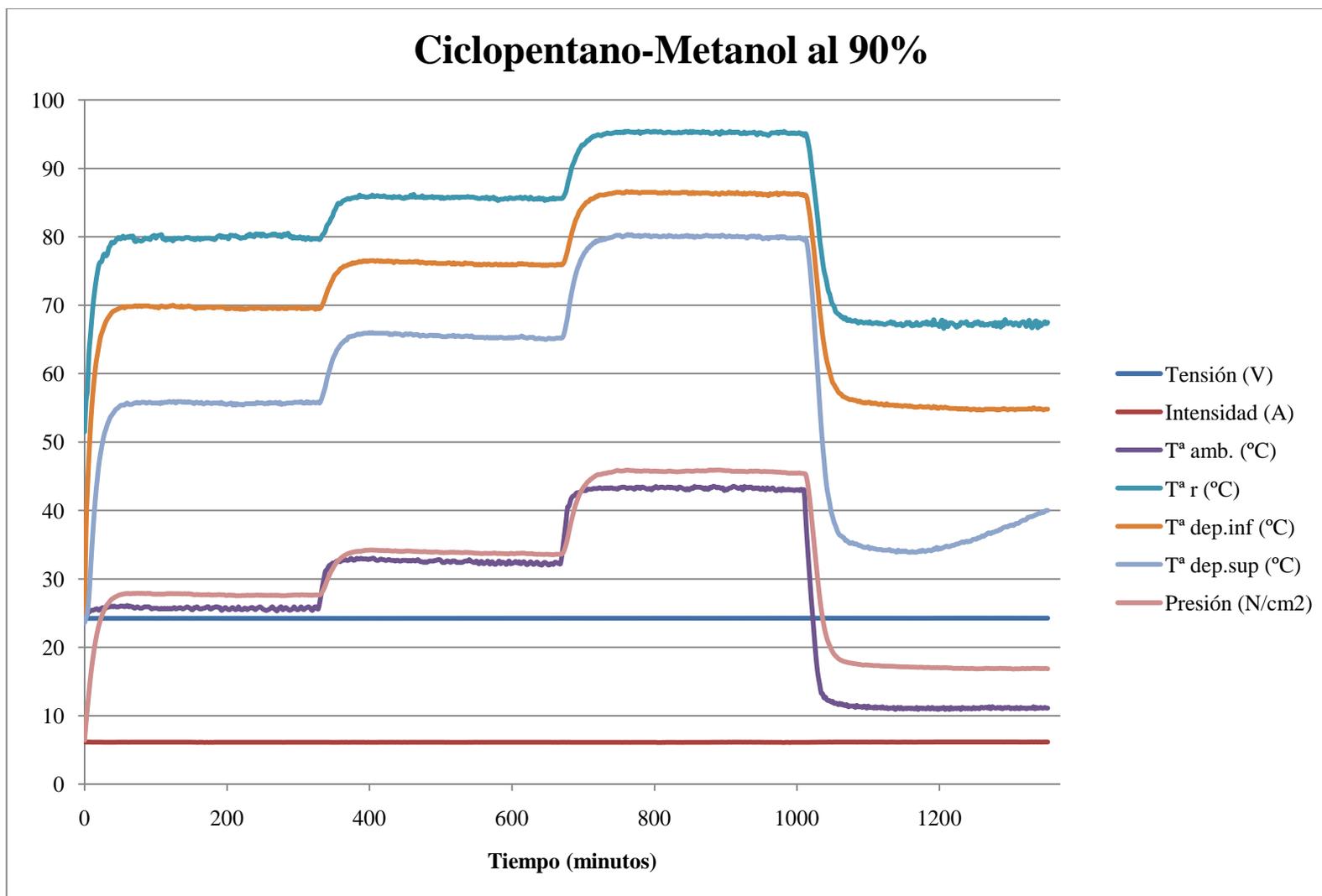
A.5 Lecturas con fluido de trabajo Ciclopentano-Metanol



Gráfica A.5-1 Lecturas de las sondas del ensayo con ciclopentano-metanol al 50%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

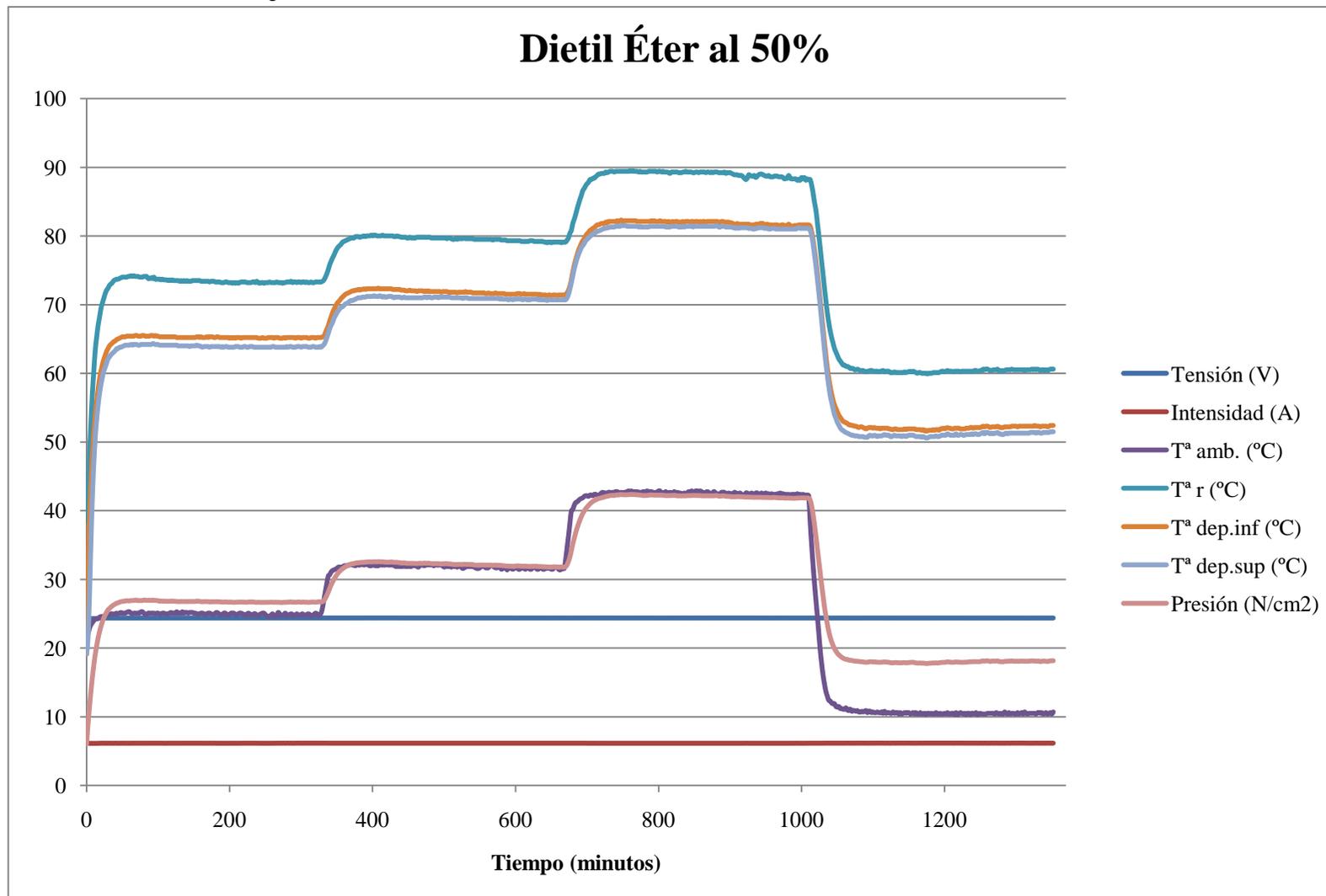


Gráfica A.5-2 Lecturas de las sondas del ensayo con ciclopentano-metanol al 70%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

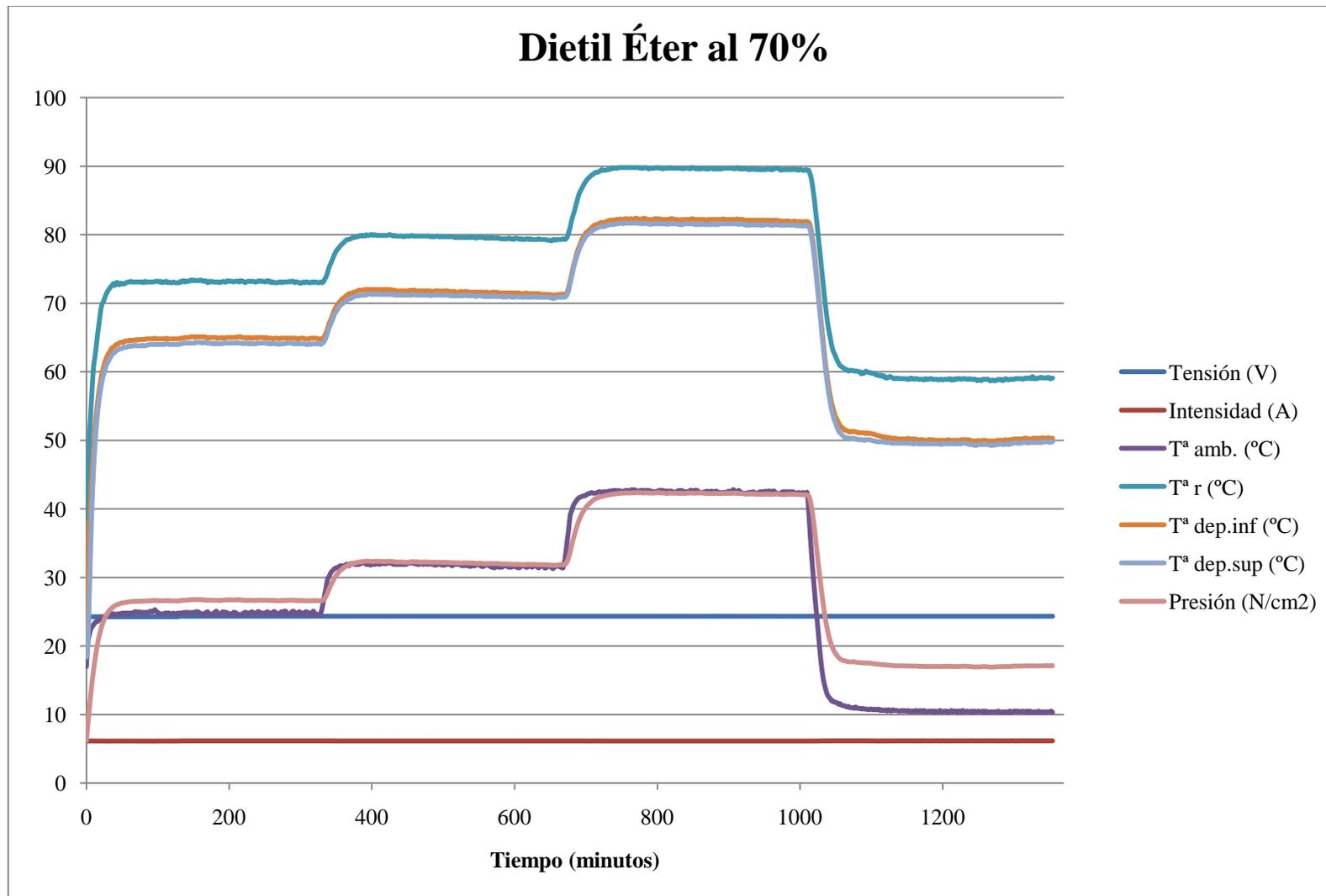


Gráfica A.5-3 Lecturas de las sondas del ensayo con ciclopentano-metanol al 90%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

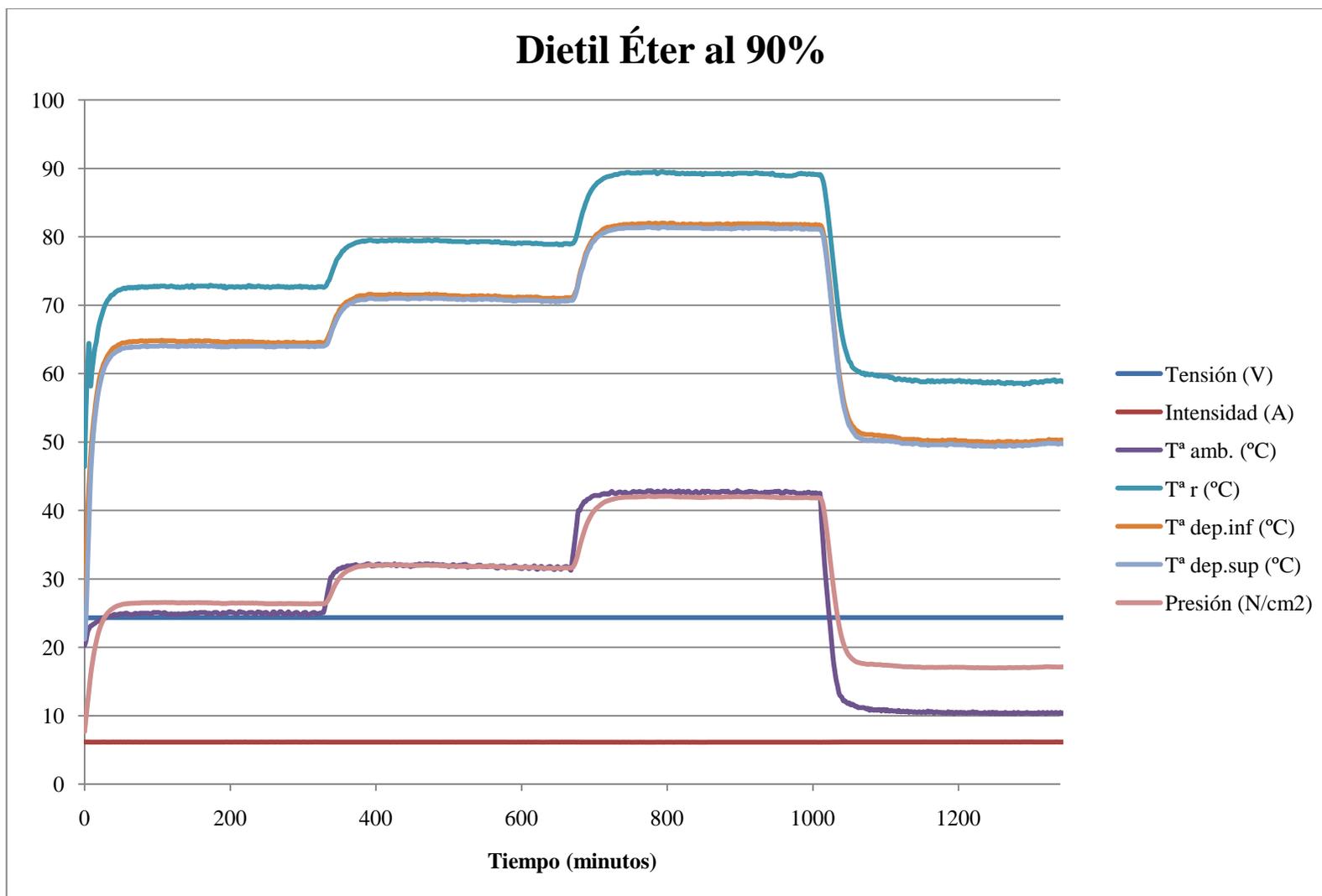
A.6 Lecturas con fluido de trabajo Dietil Éter



Gráfica A.6-1 Lecturas de las sondas del ensayo con dietil éter al 50%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

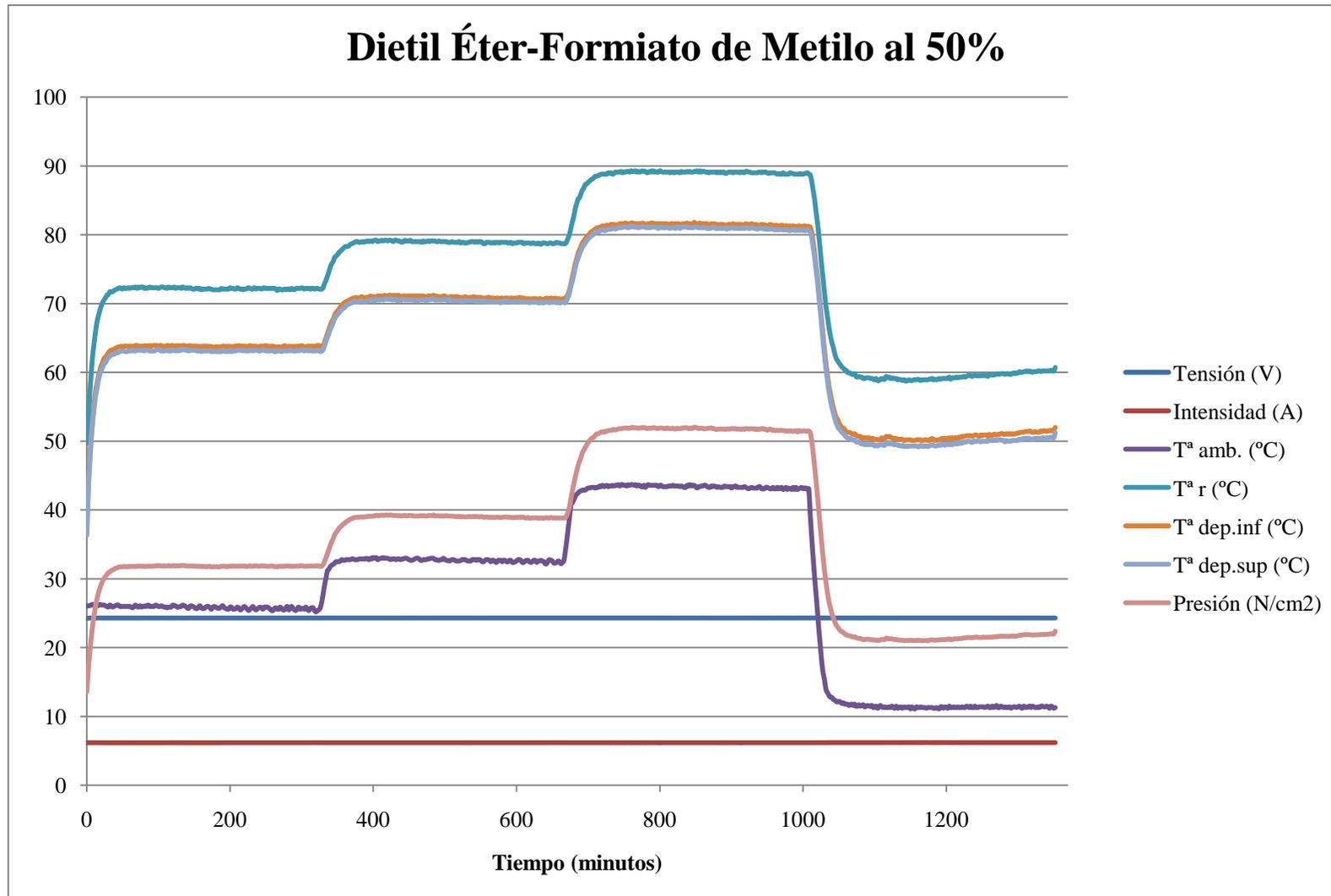


Gráfica A.6-2 Lecturas de las sondas del ensayo con dietil éter al 70%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

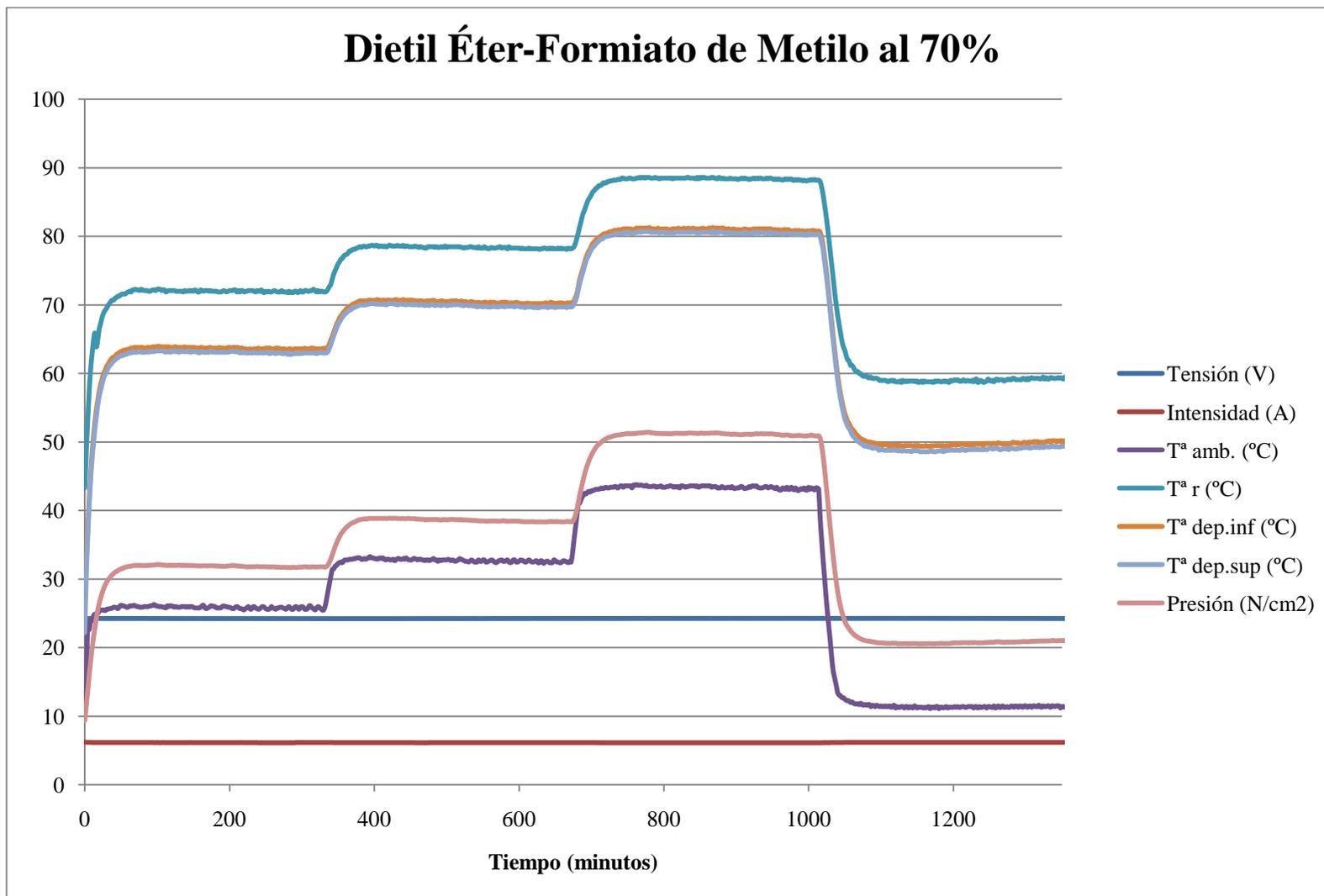


Gráfica A.6-3 Lecturas de las sondas del ensayo con dietil éter al 90%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

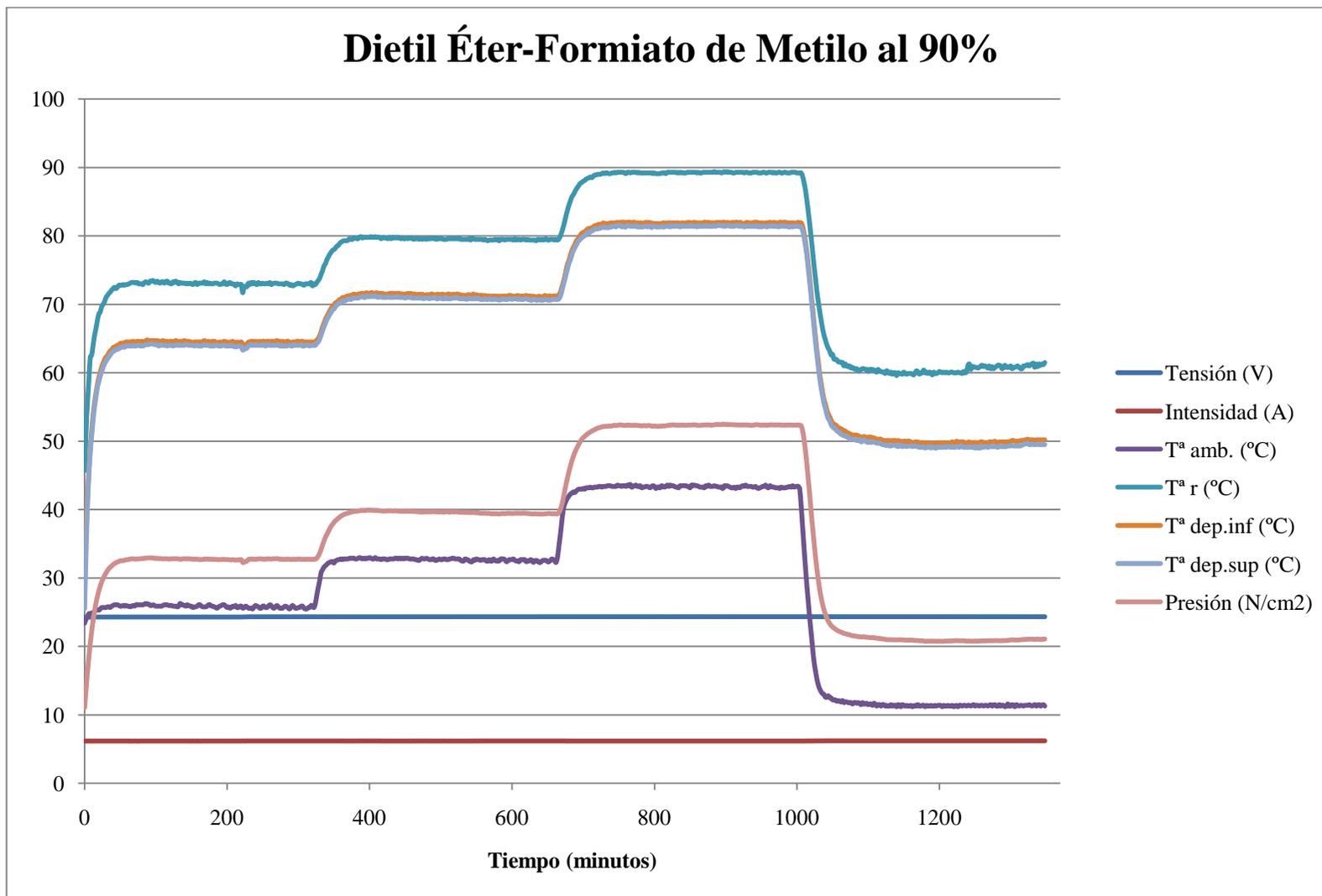
A.7 Lecturas con fluido de trabajo Dietil Éter-Formiato de Metilo



Gráfica A.7-1 Lecturas de las sondas del ensayo con dietil éter-formiato de metilo al 50%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

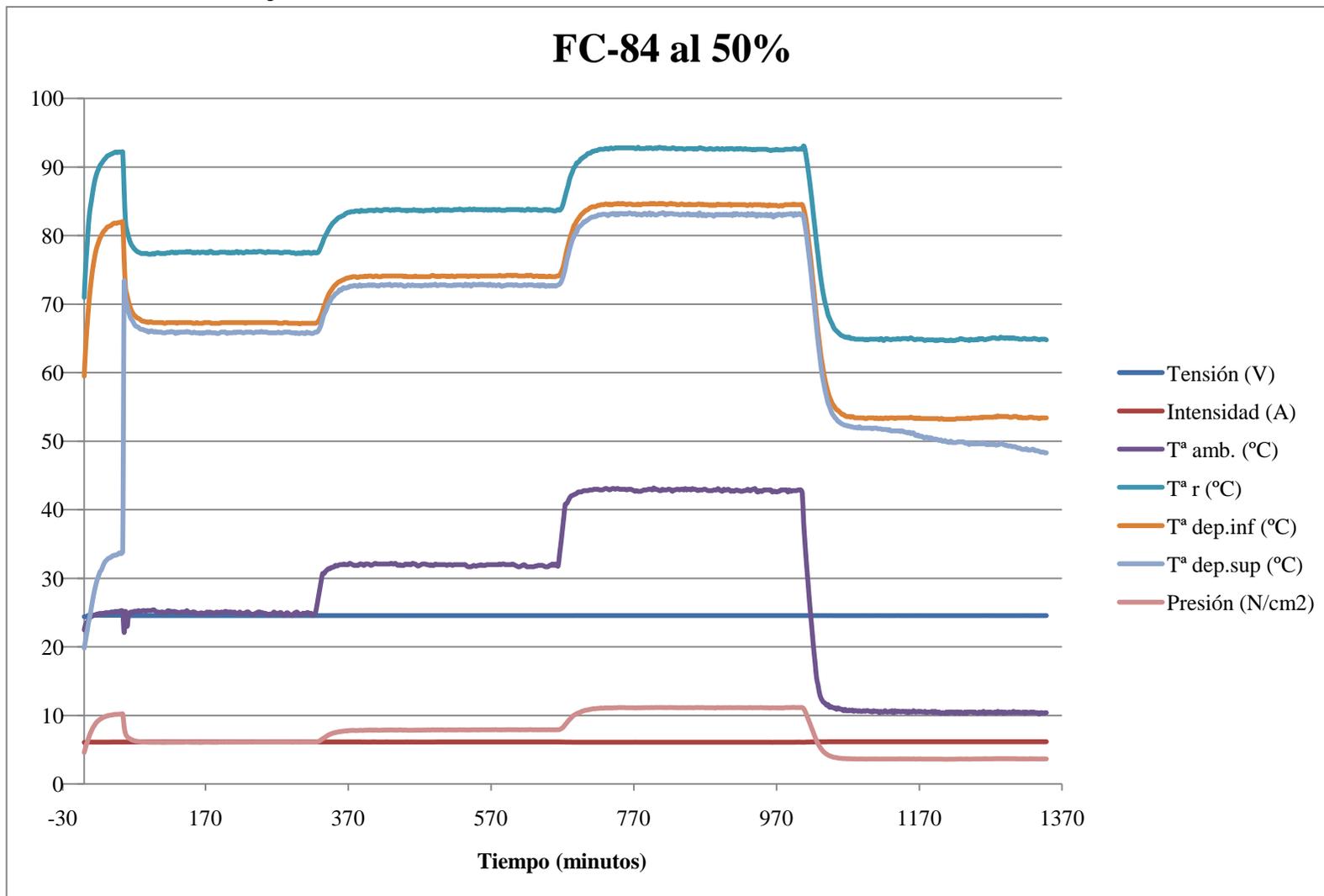


Gráfica A.7-2 Lecturas de las sondas del ensayo con dietil éter-formiato de metilo al 70%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

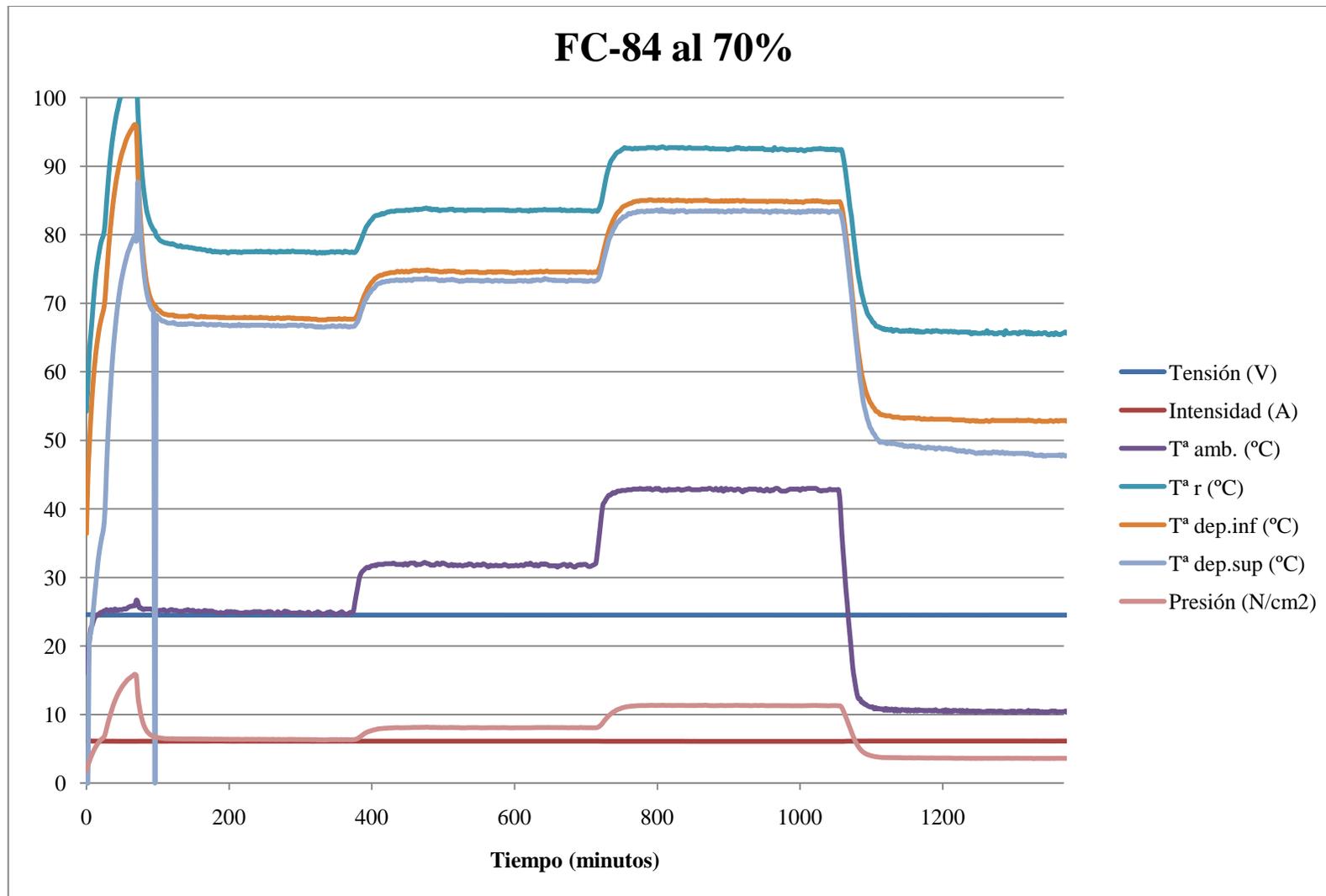


Gráfica A.7-3 Lecturas de las sondas del ensayo con dietil éter-formiato de metilo al 90%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

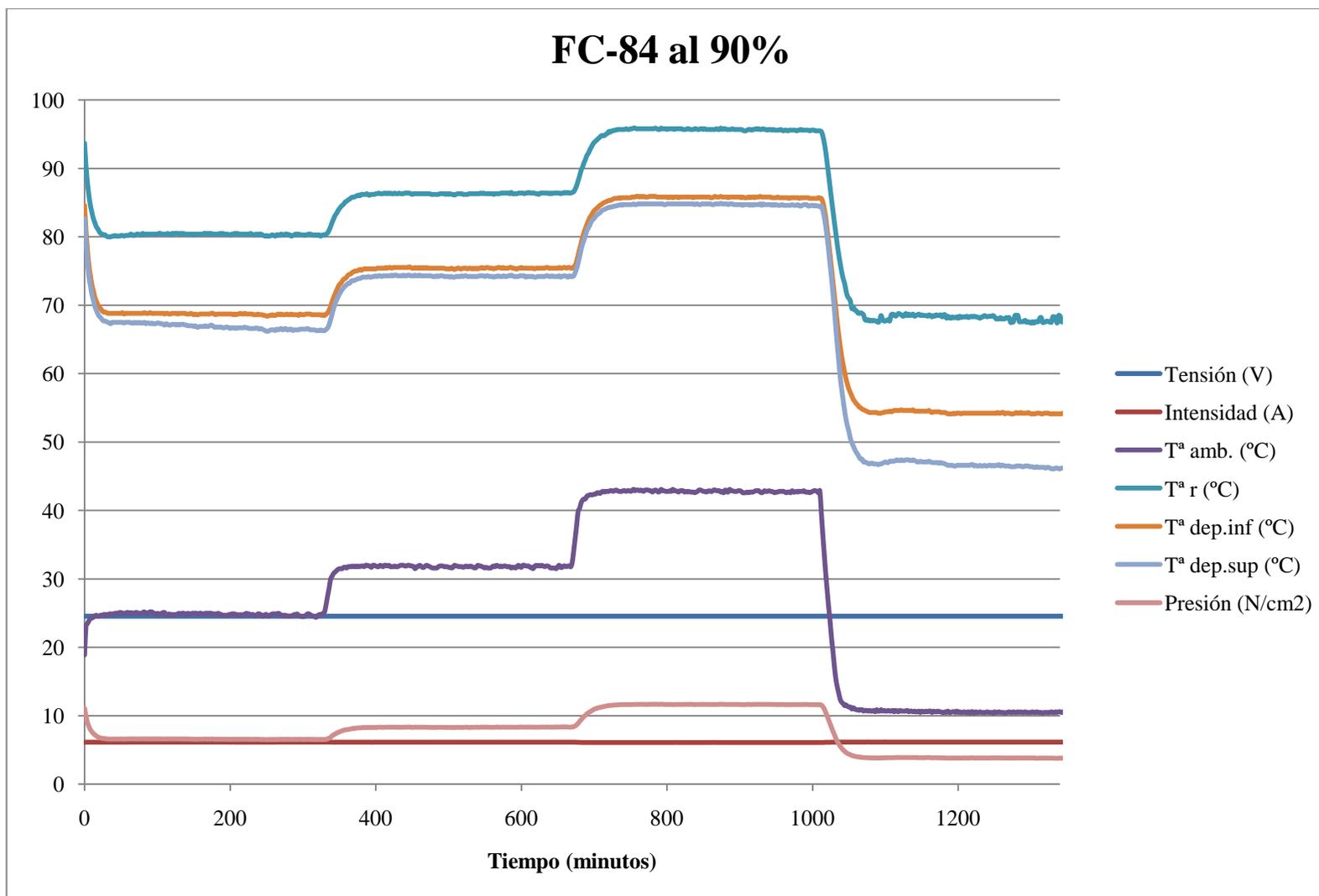
A.8 Lecturas con fluido de trabajo FC-84



Gráfica A.8-1 Lecturas de las sondas del ensayo con FC-84 al 50%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

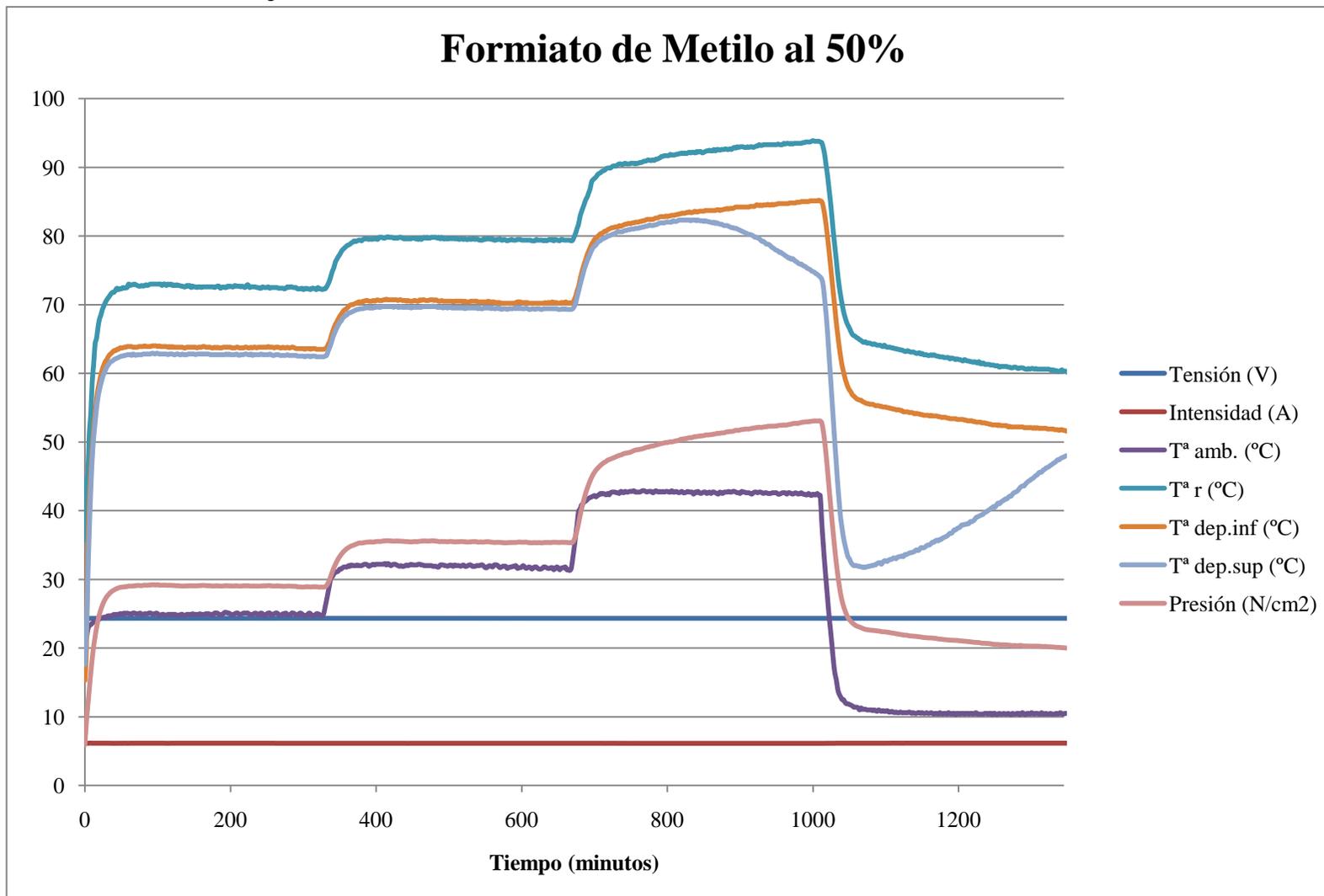


Gráfica A.8-2 Lecturas de las sondas del ensayo con FC-84 al 70%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

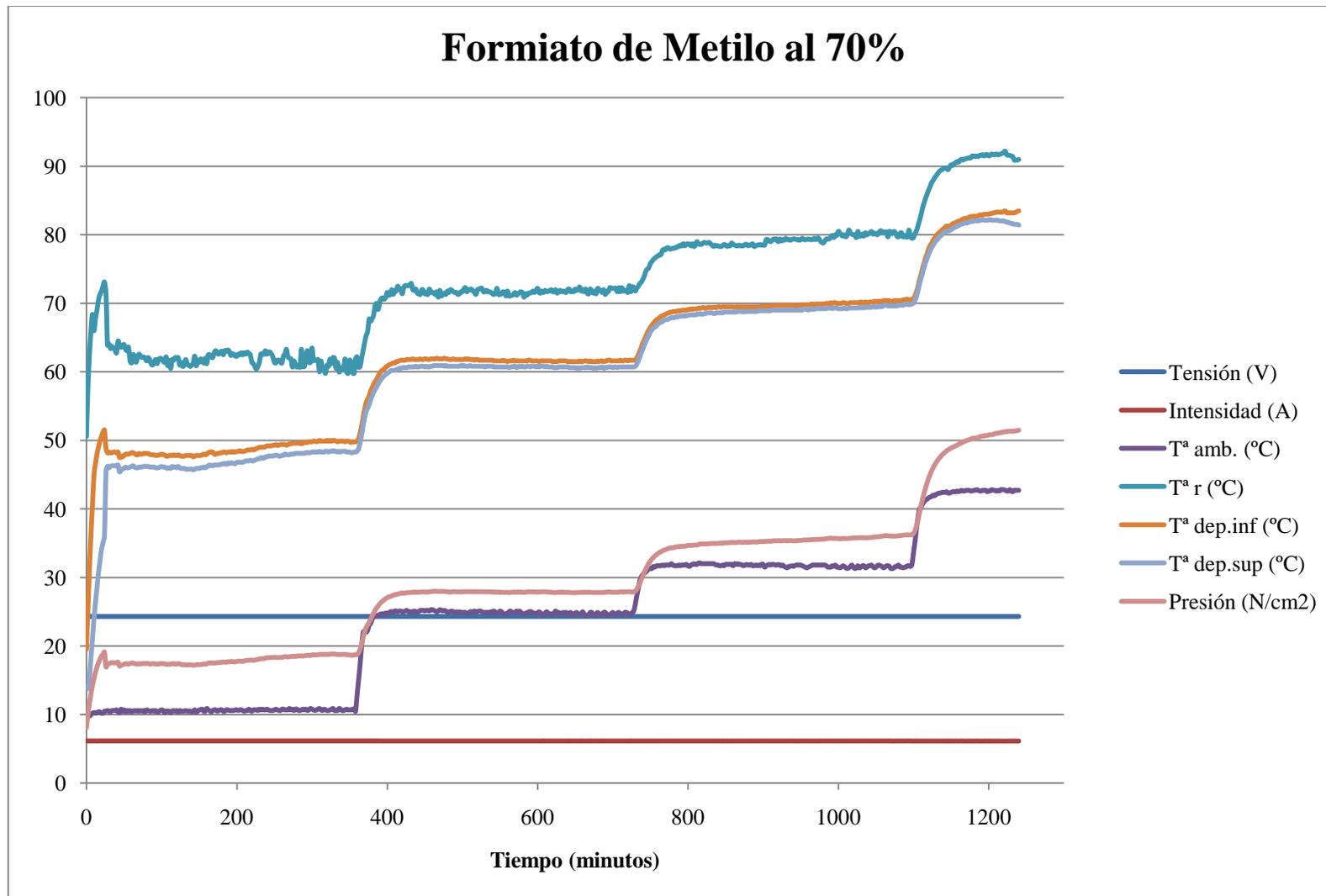


Gráfica A.8-3 Lecturas de las sondas del ensayo con FC-84 al 90%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

A.9 Lecturas con fluido de trabajo Formiato de Metilo

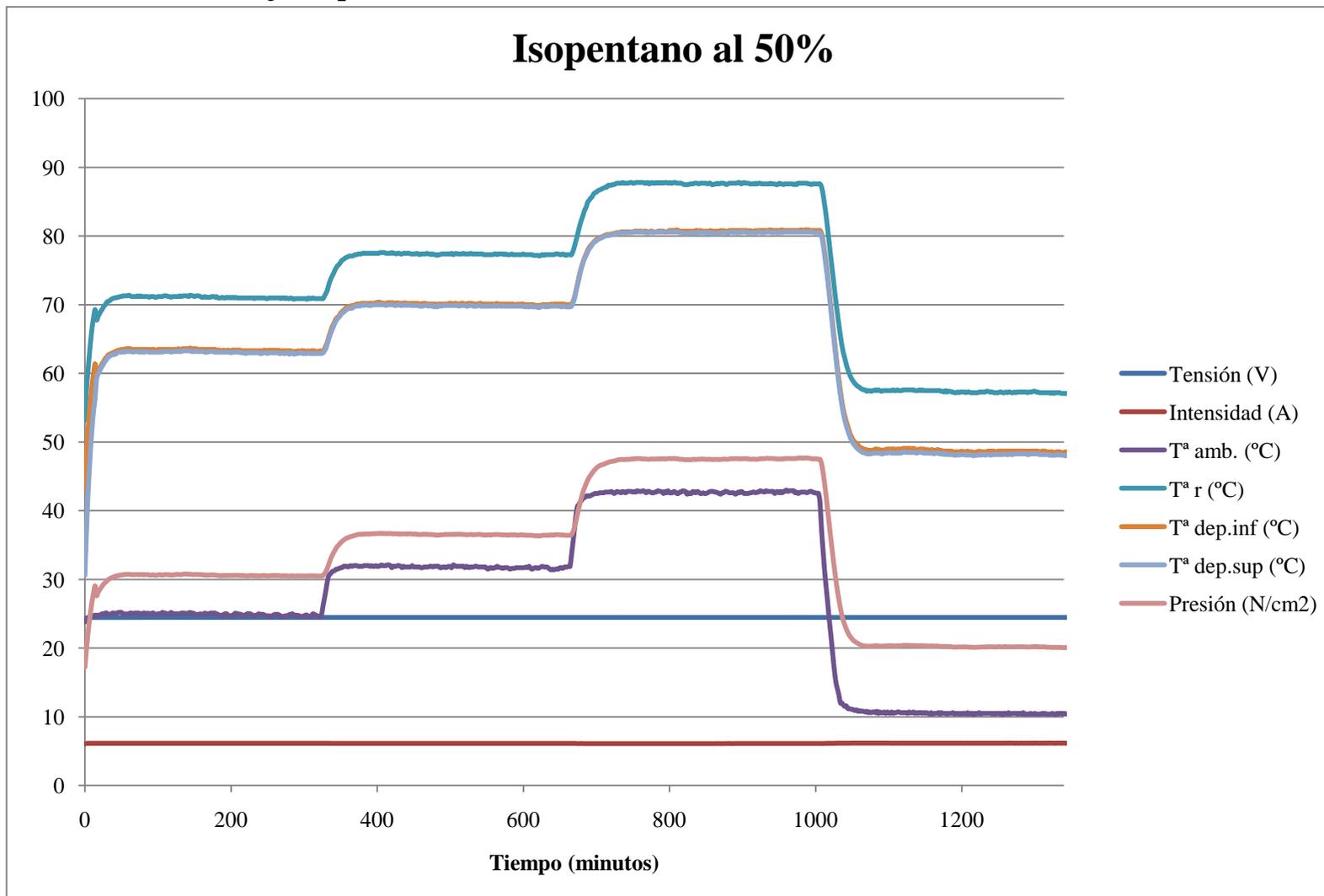


Gráfica A.9-1 Lecturas de las sondas del ensayo con formiato de metilo al 50%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

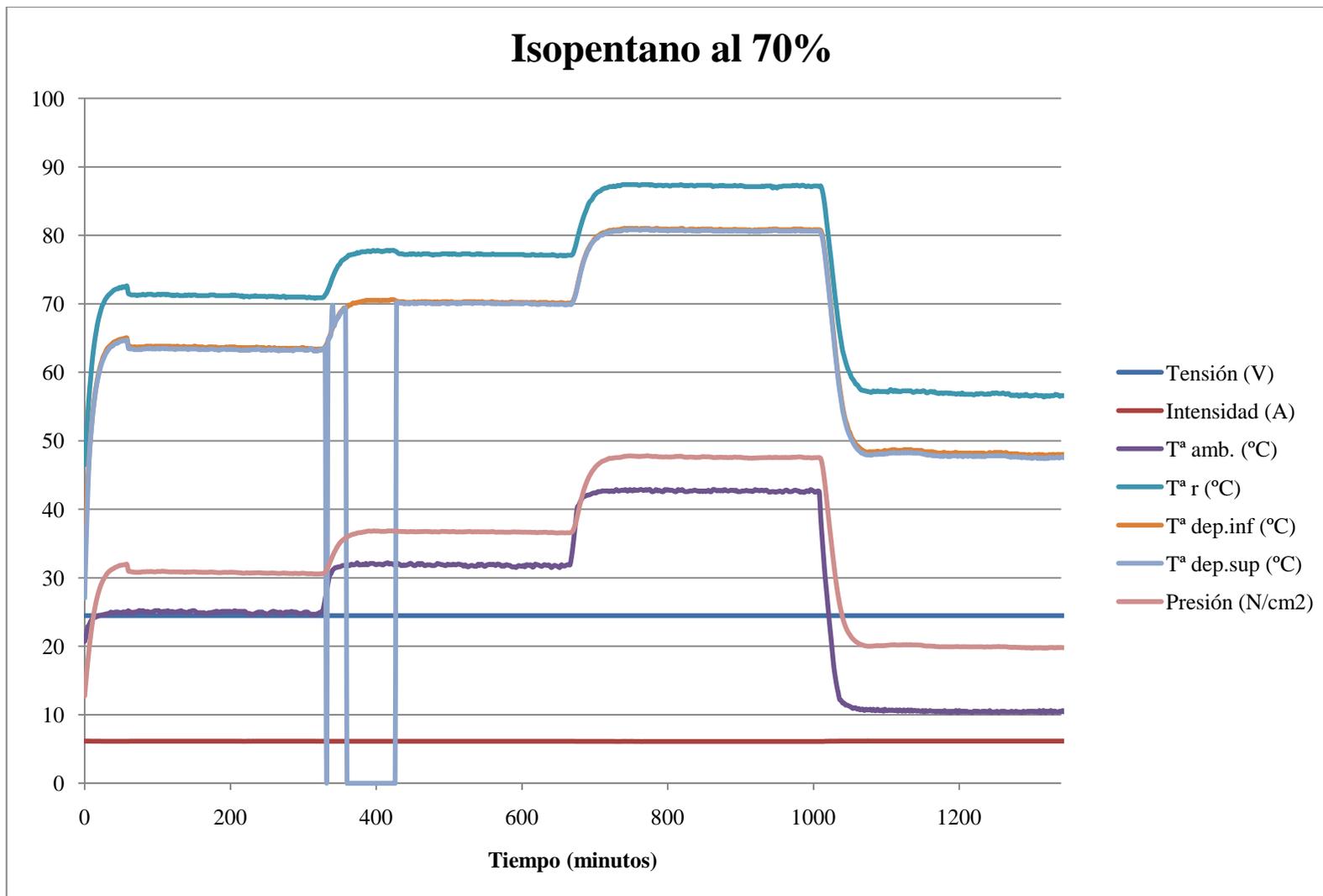


Gráfica A.9-2 Lecturas de las sondas del ensayo con formiato de metilo al 70%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

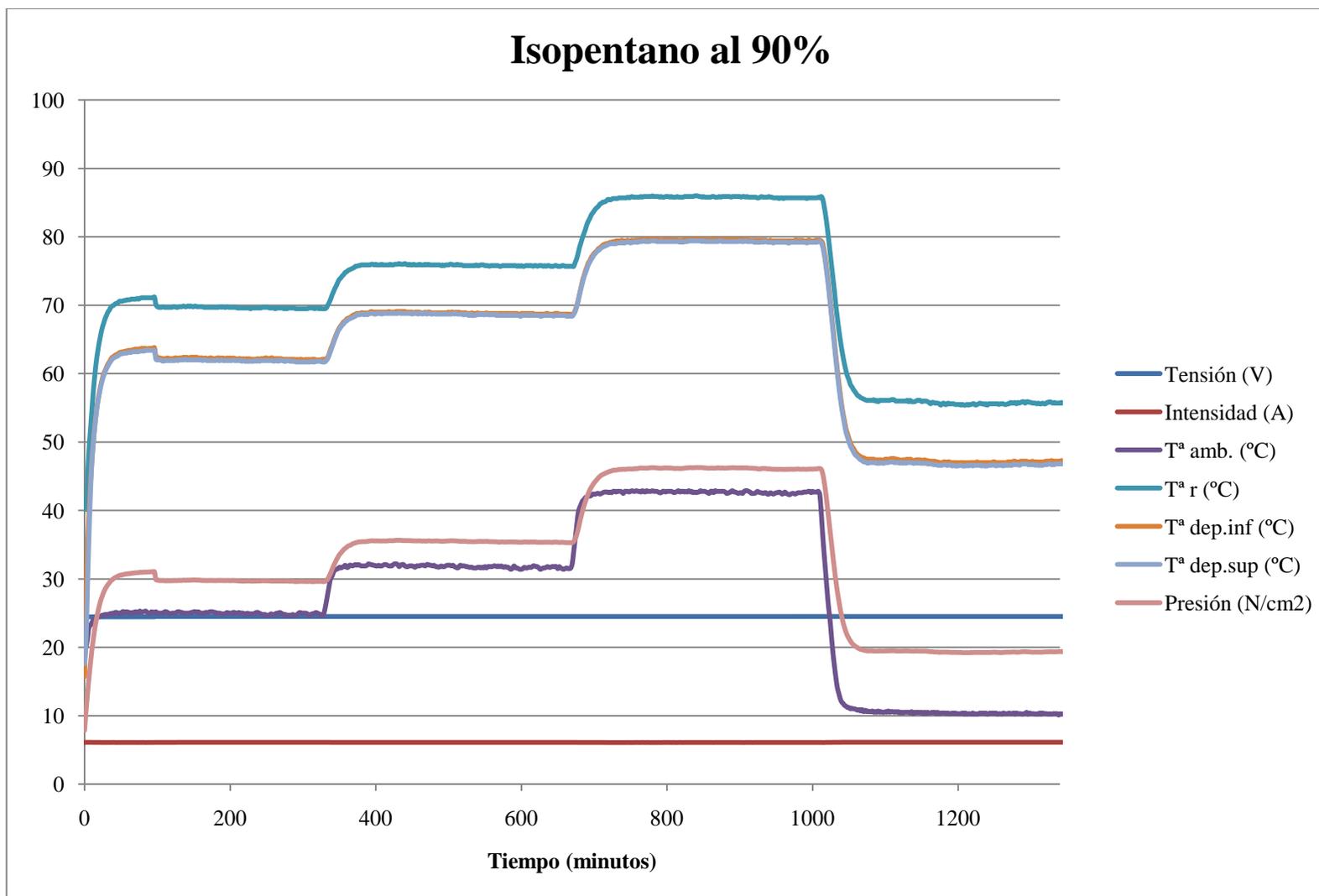
A.10 Lecturas con fluido de trabajo Isopentano



Gráfica A.10-1 Lecturas de las sondas del ensayo con isopentano al 50%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

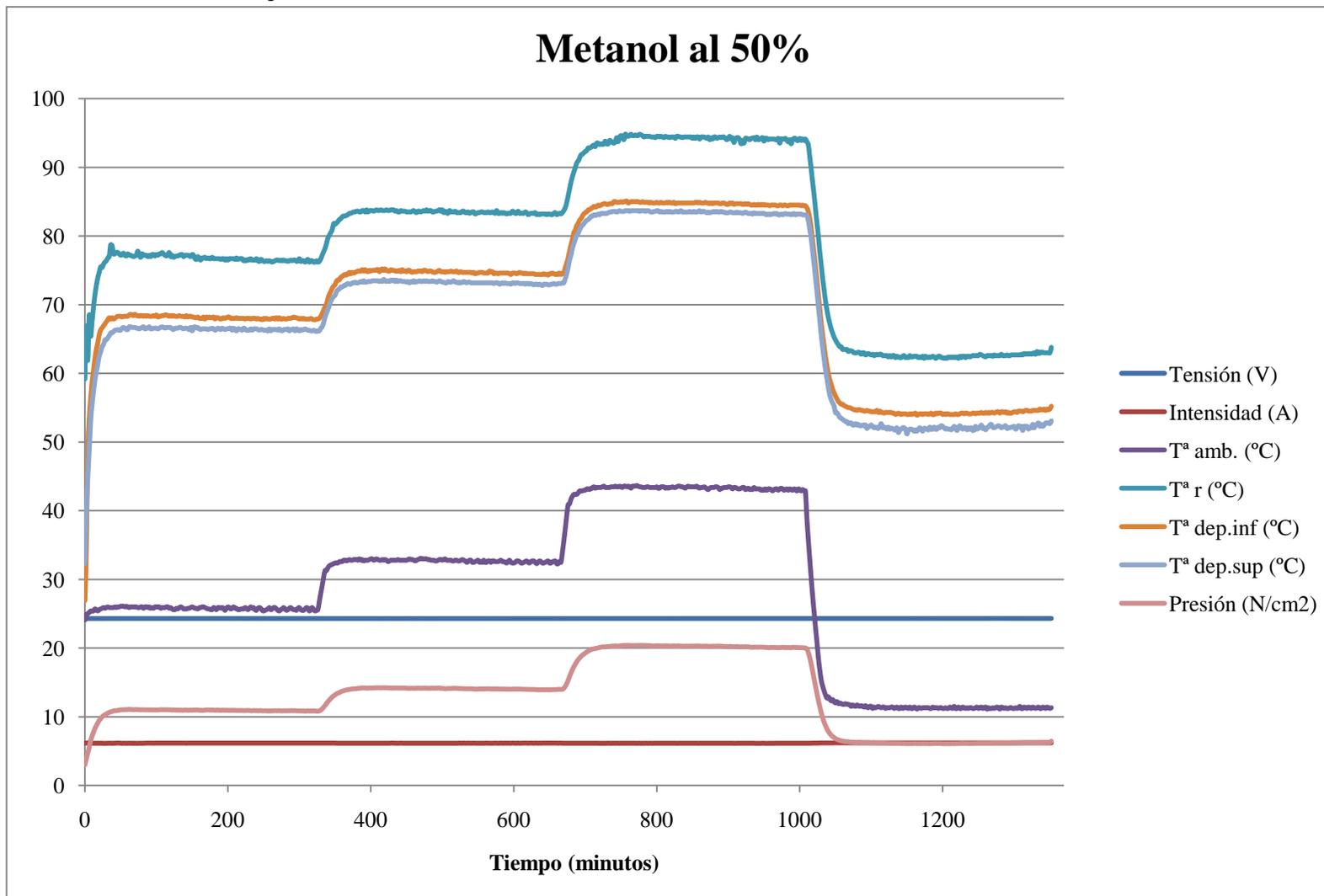


Gráfica A.10-2 Lecturas de las sondas del ensayo con isopentano al 70%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

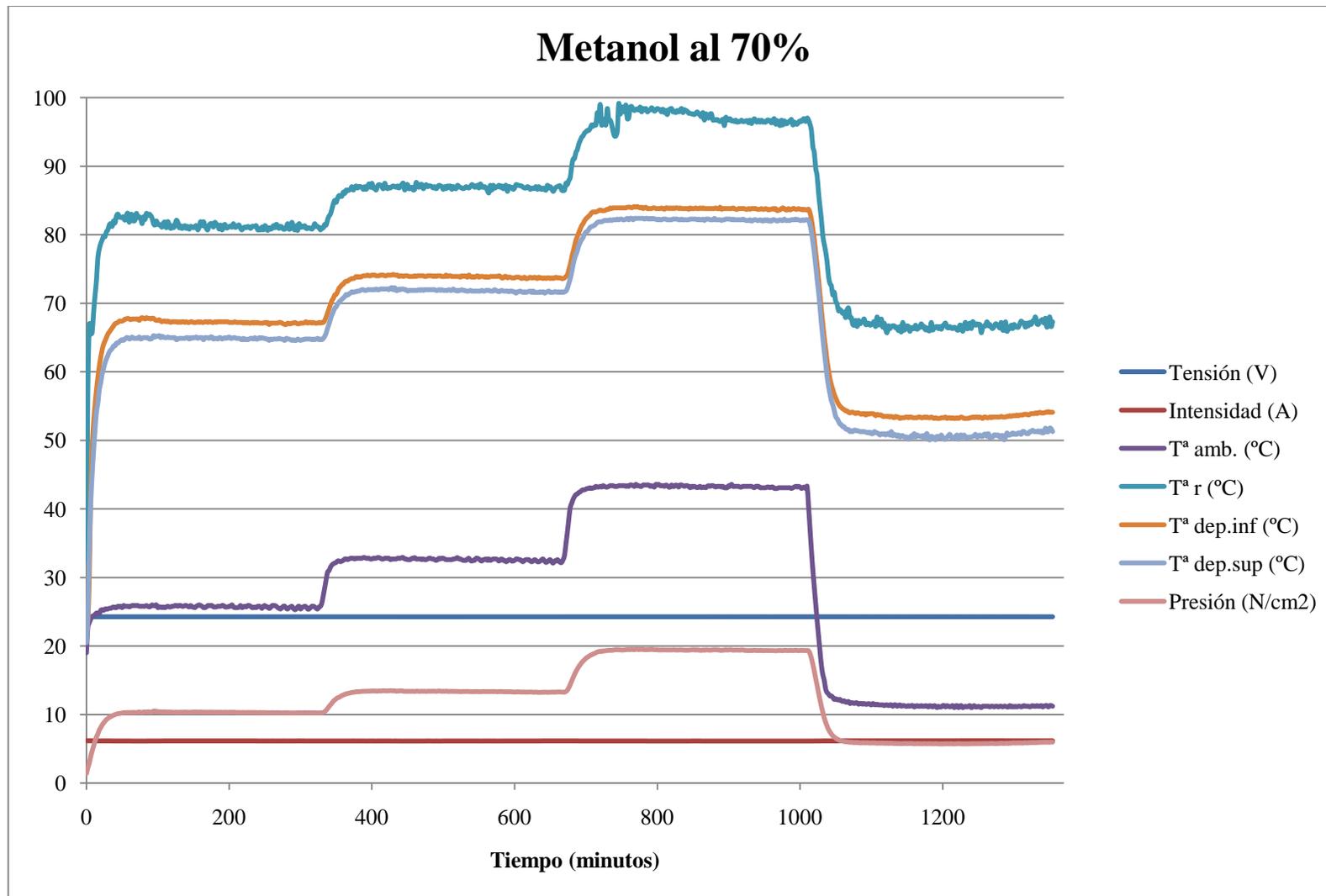


Gráfica A.10-3 Lecturas de las sondas del ensayo con isopentano al 90%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

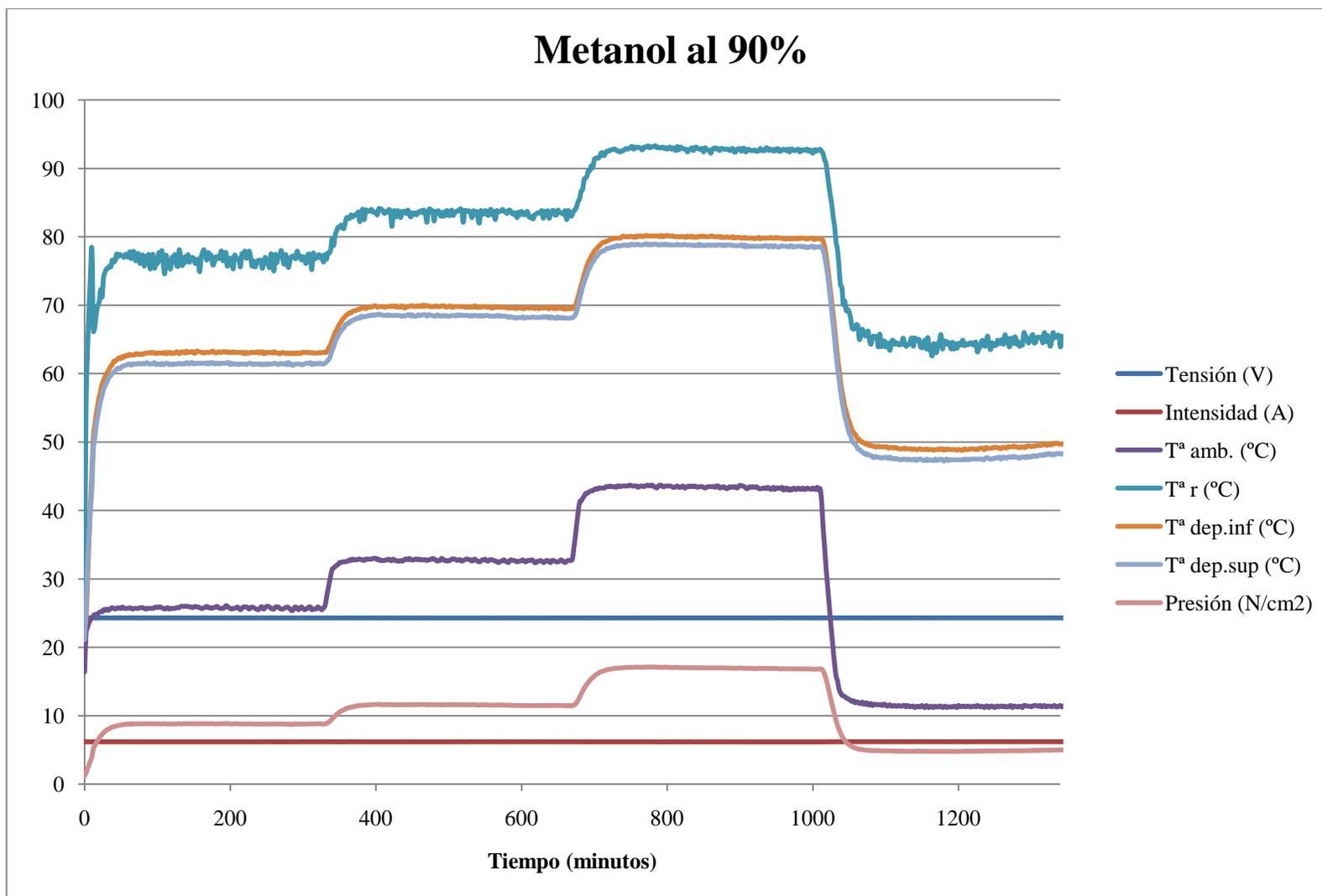
A.11 Lecturas con fluido de trabajo Metanol



Gráfica A.11-1 Lecturas de las sondas del ensayo con metanol al 50%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

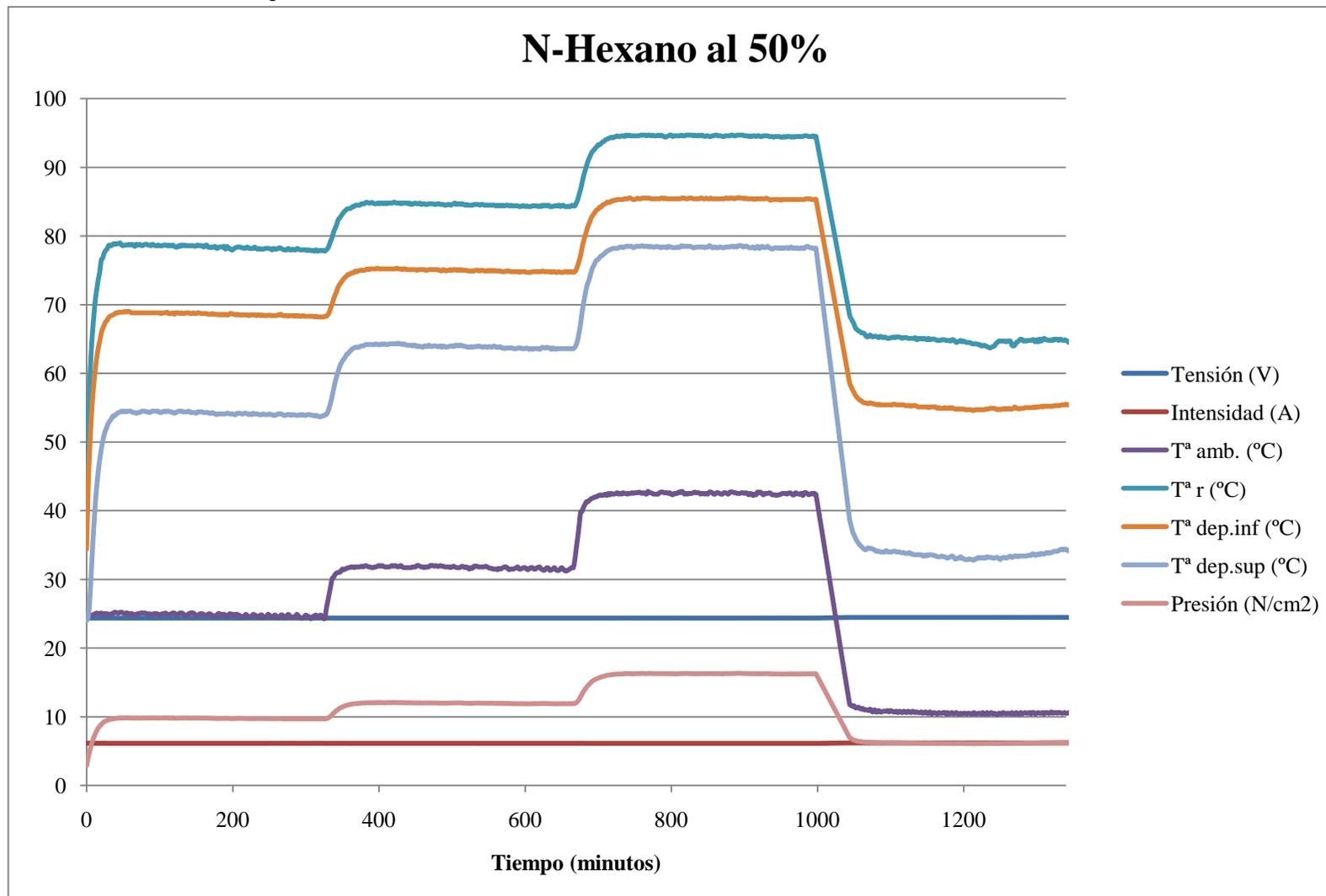


Gráfica A.11-2 Lecturas de las sondas del ensayo con metanol al 70%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

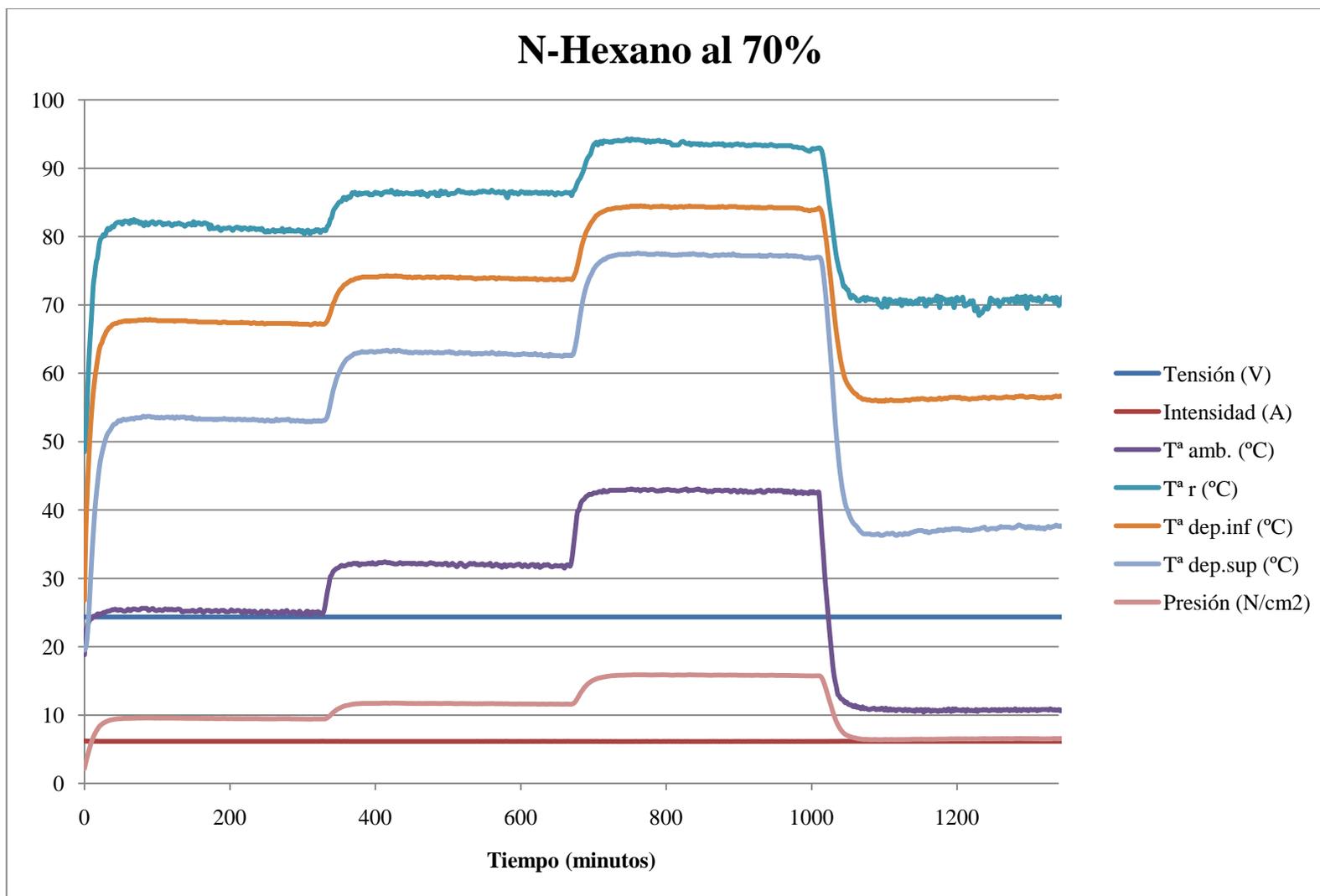


Gráfica A.11-3 Lecturas de las sondas del ensayo con metanol al 90%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

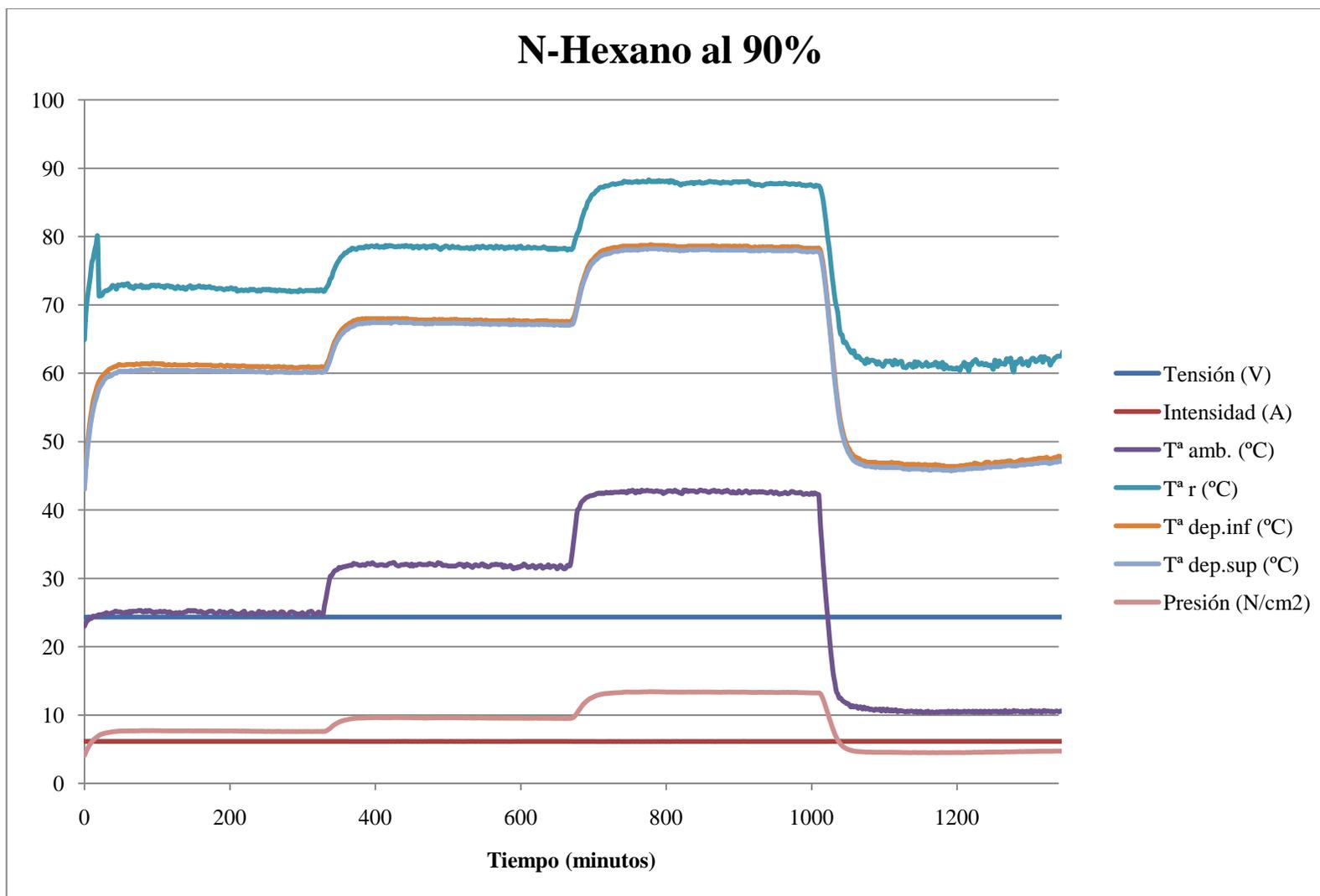
A.12 Lecturas con fluido de trabajo N-Hexano



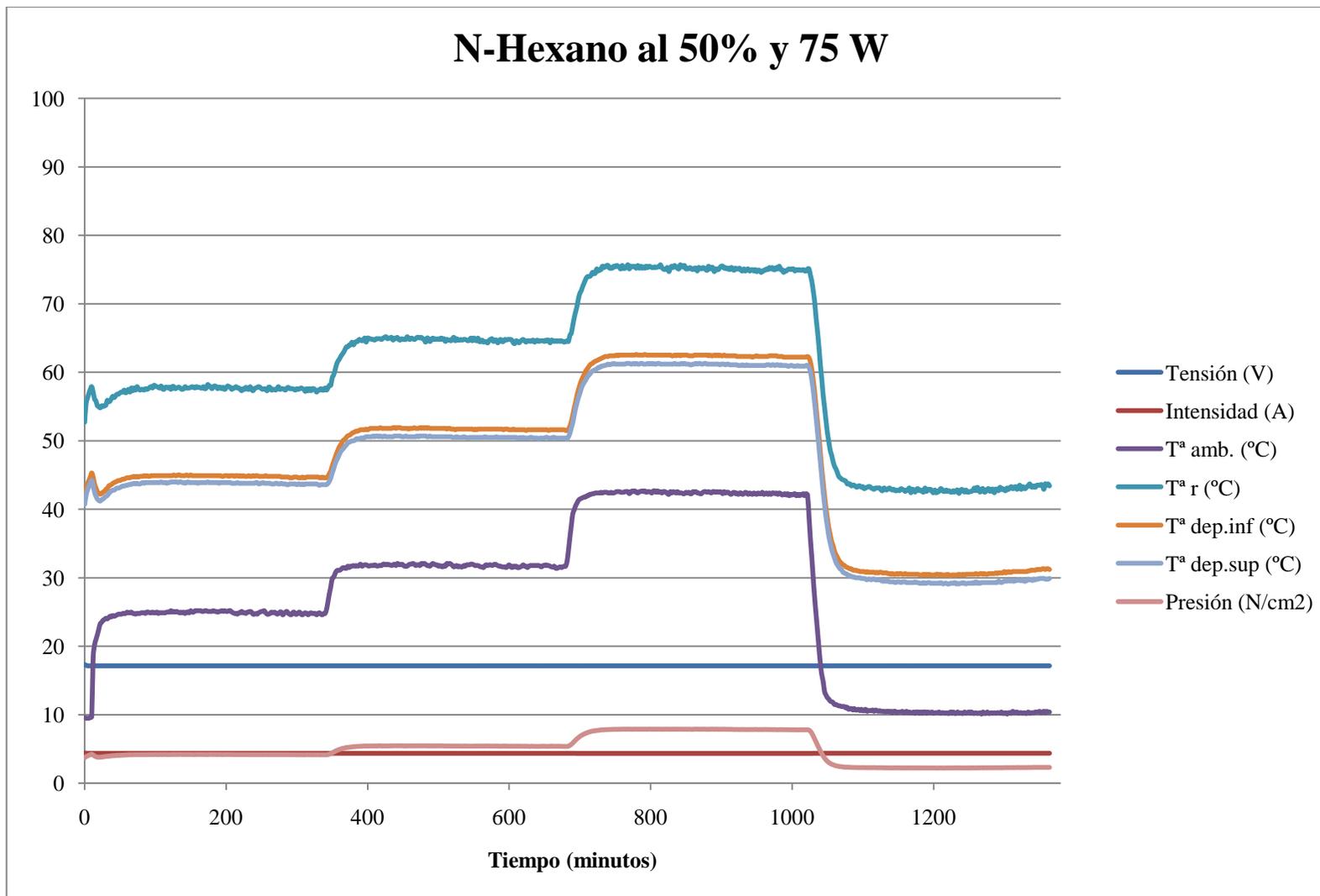
Gráfica A.12-1 Lecturas de las sondas del ensayo con N-hexano al 50%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.



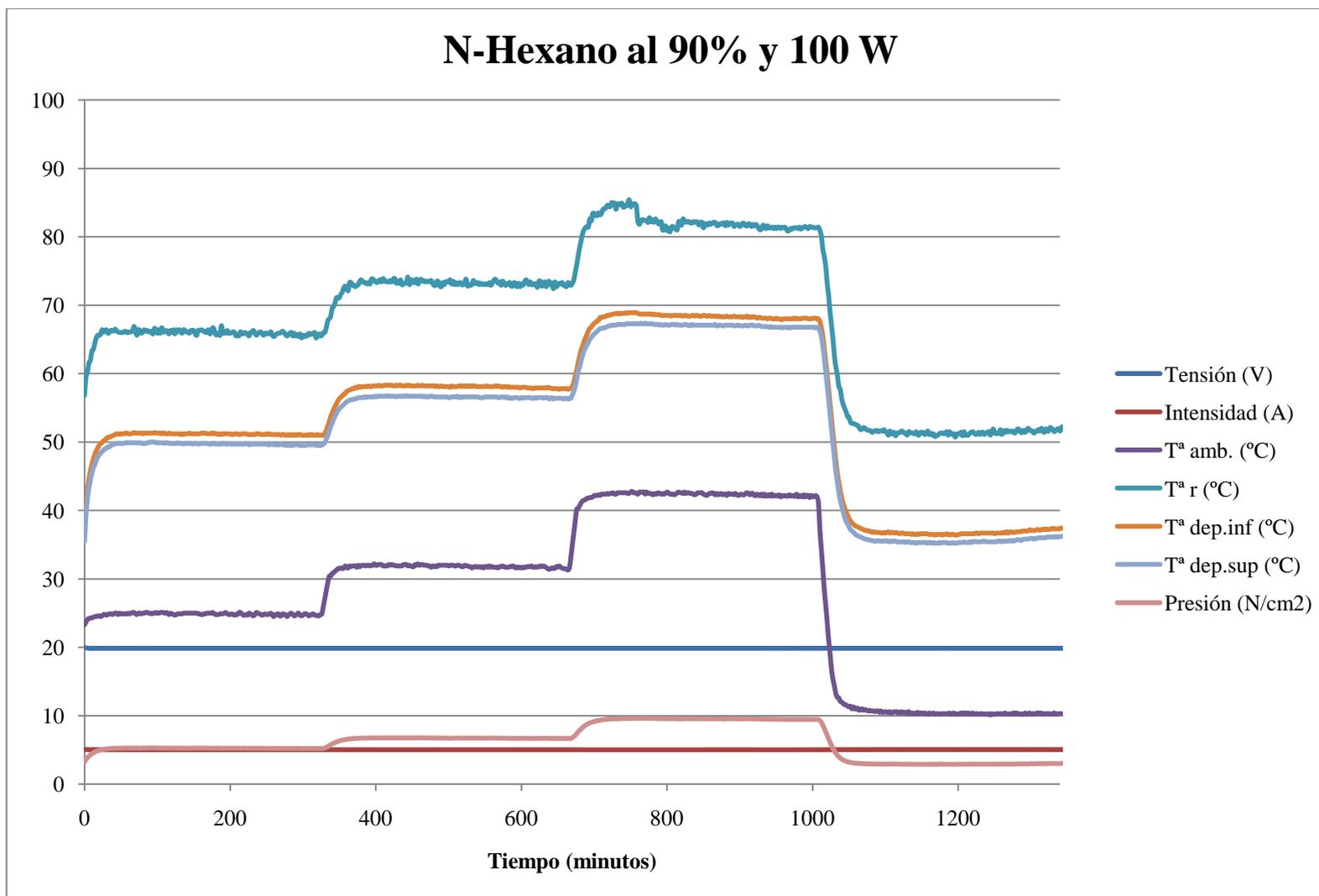
Gráfica A.12-2 Lecturas de las sondas del ensayo con N-hexano al 70%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.



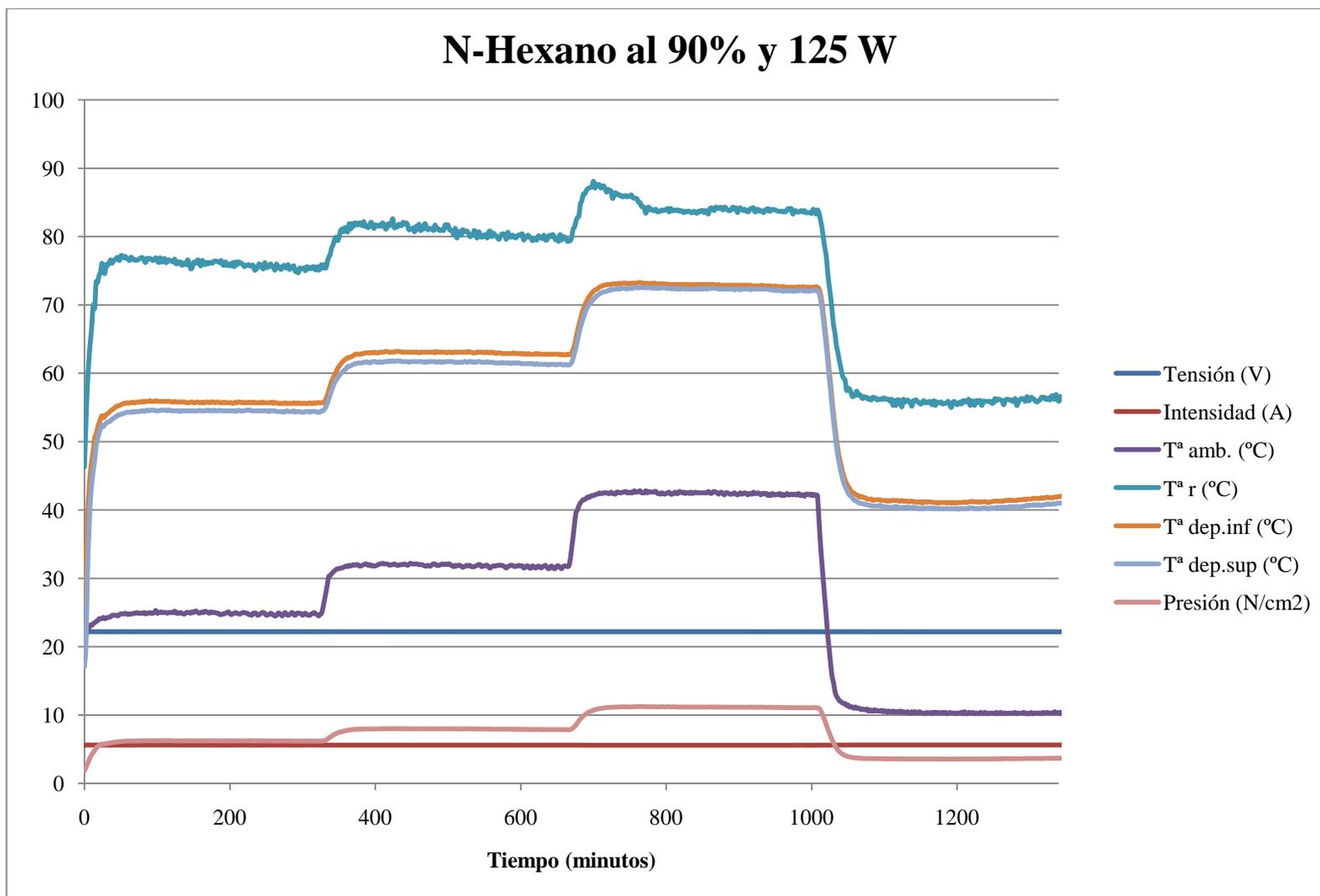
Gráfica A.12-3 Lecturas de las sondas del ensayo con N-hexano al 90%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.



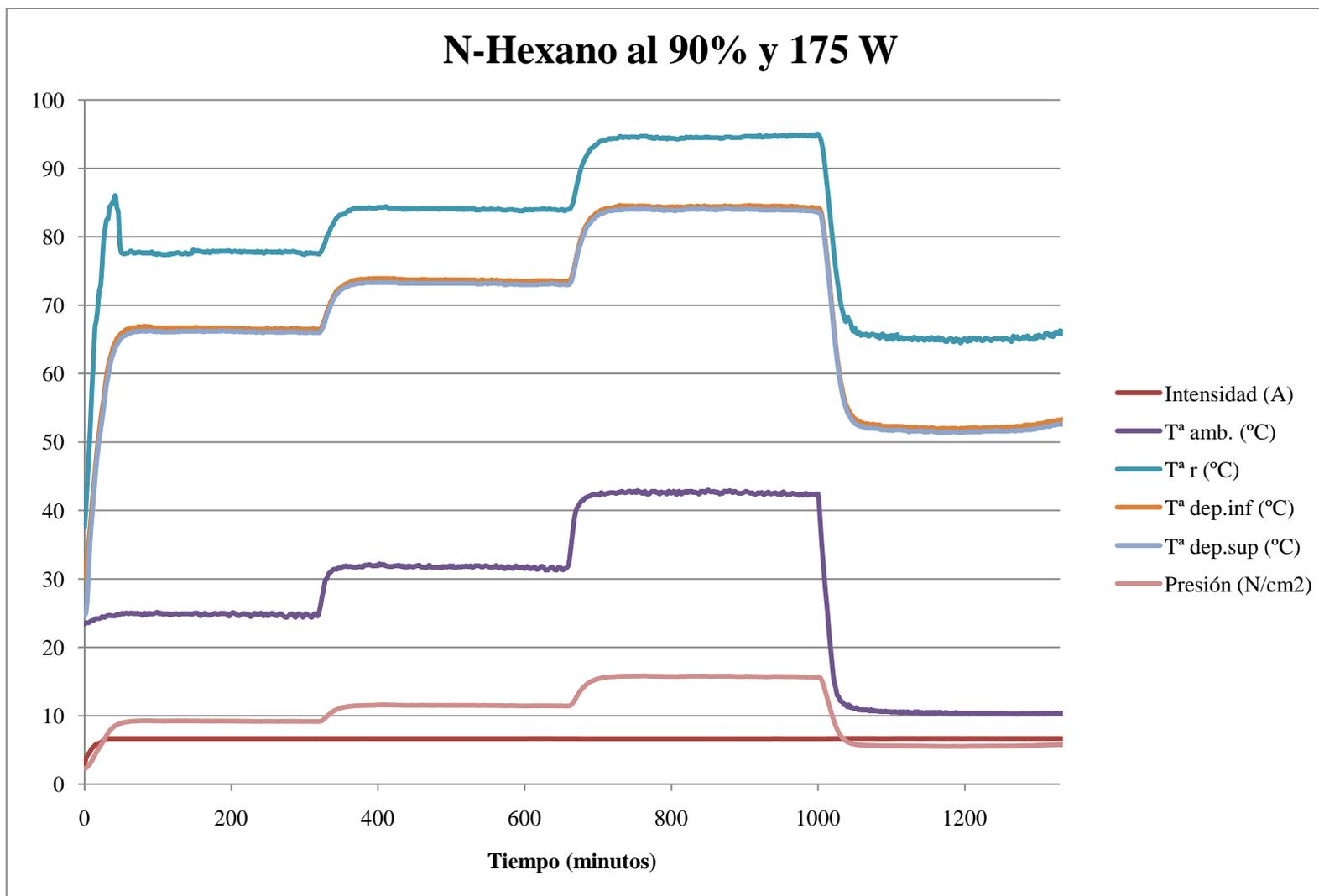
Gráfica A.12-4 Lecturas de las sondas del ensayo con N-hexano al 90%, con 75 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.



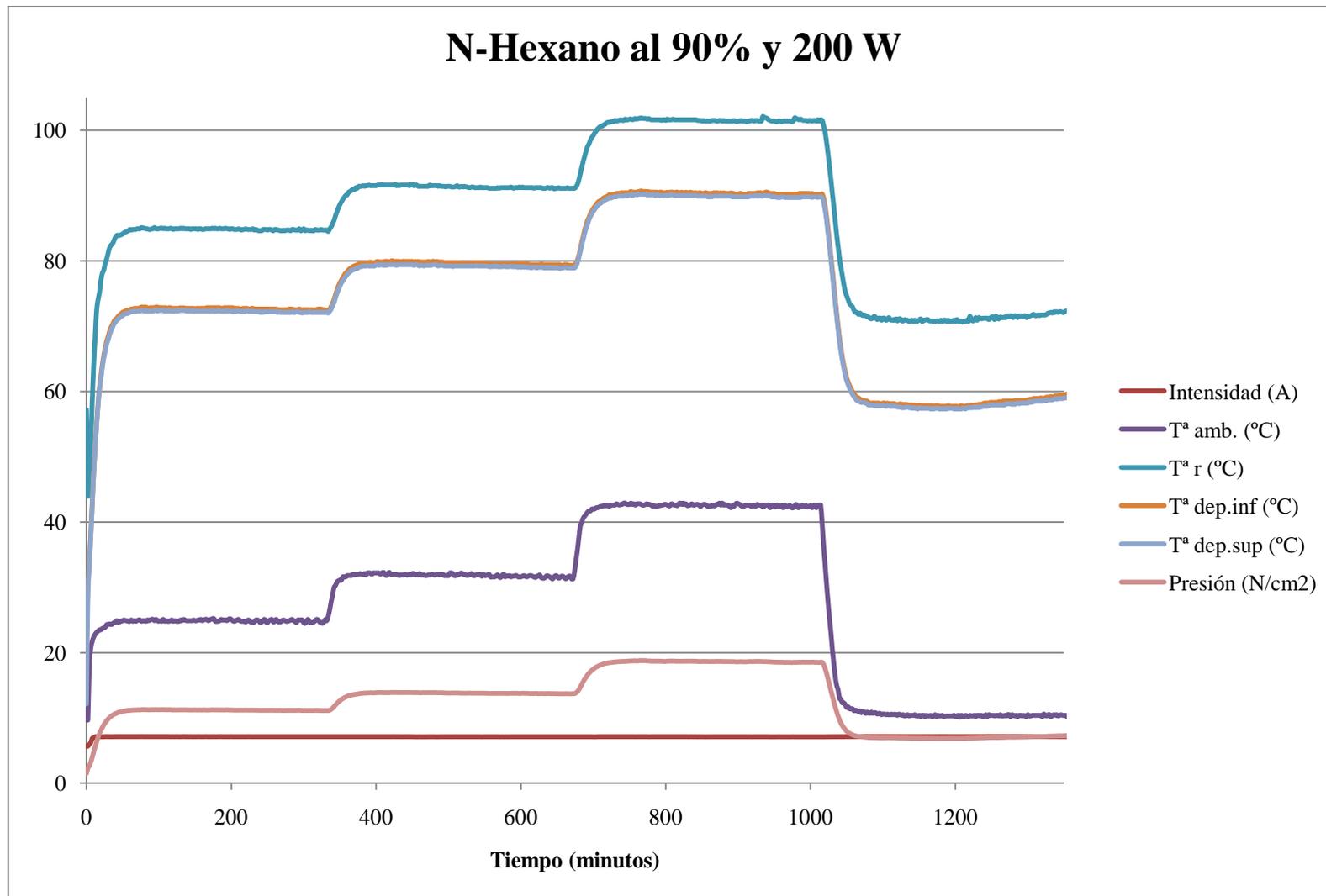
Gráfica A.12-5 Lecturas de las sondas del ensayo con N-hexano al 90%, con 100 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.



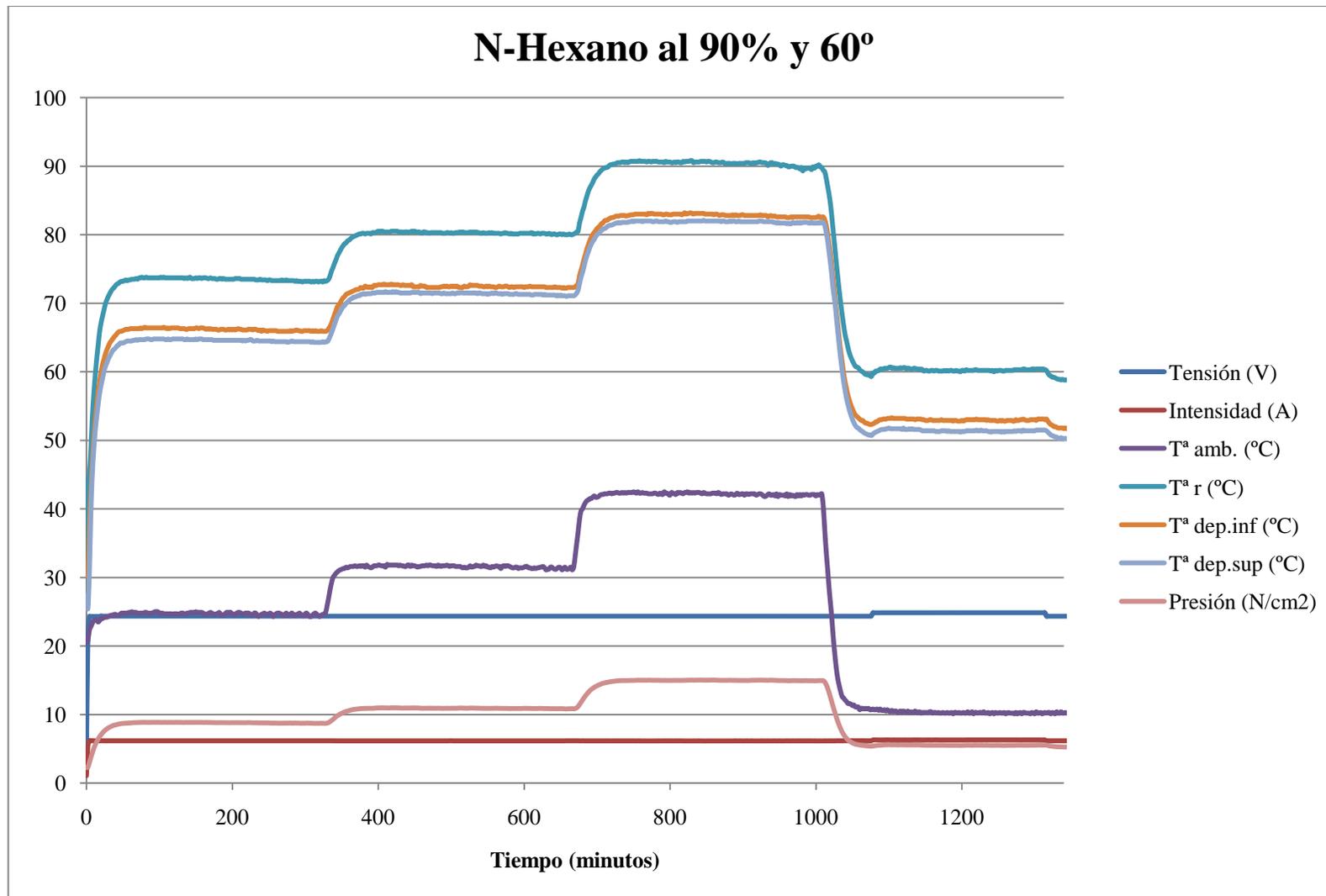
Gráfica A.12-6 Lecturas de las sondas del ensayo con N-hexano al 90%, con 125 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.



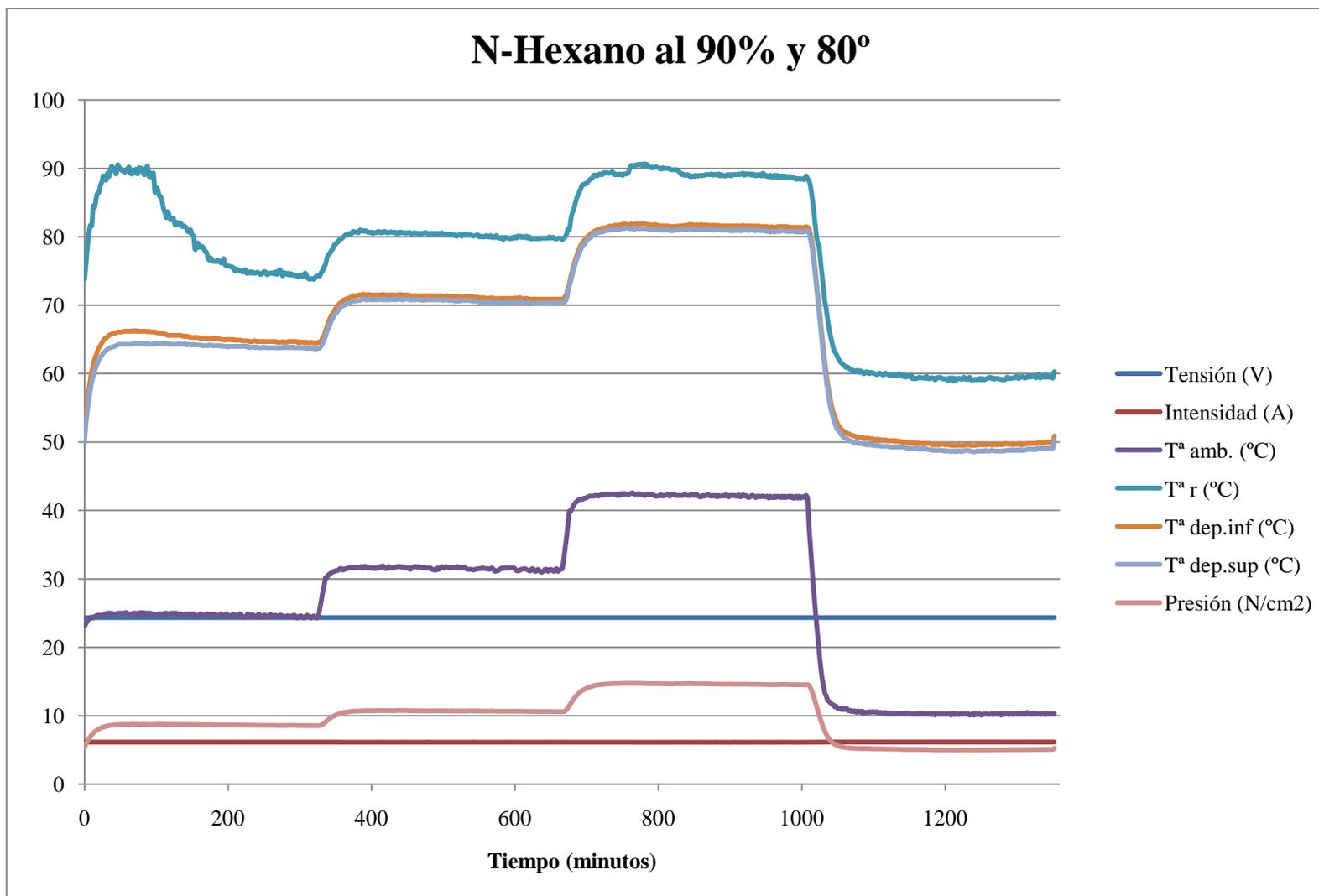
Gráfica A.12-7 Lecturas de las sondas del ensayo con N-hexano al 90%, con 175 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.



Gráfica A.12-8 Lecturas de las sondas del ensayo con N-hexano al 90%, con 200 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

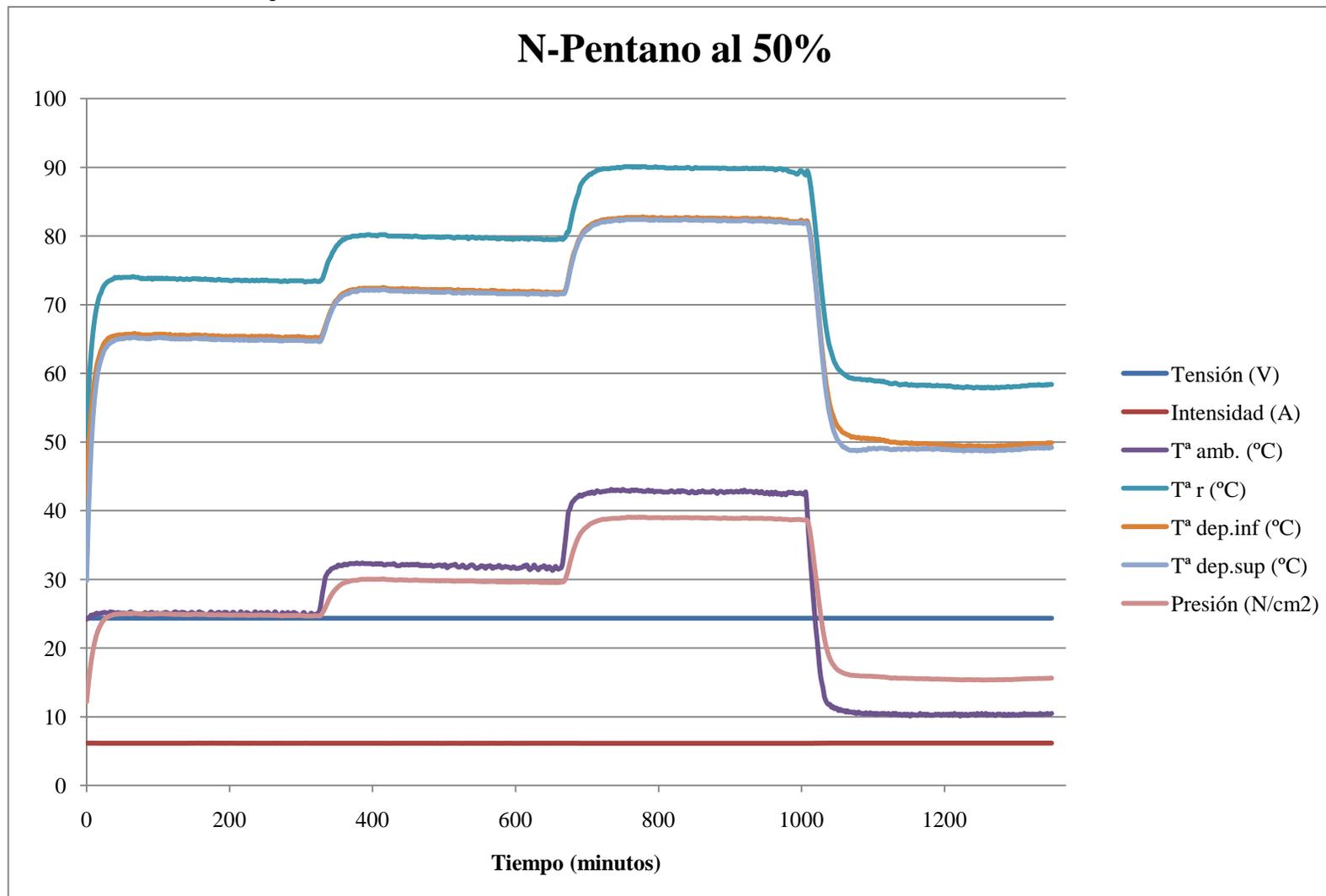


Gráfica A.12-9 Lecturas de las sondas del ensayo con N-hexano al 90%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón con 60° de inclinación.

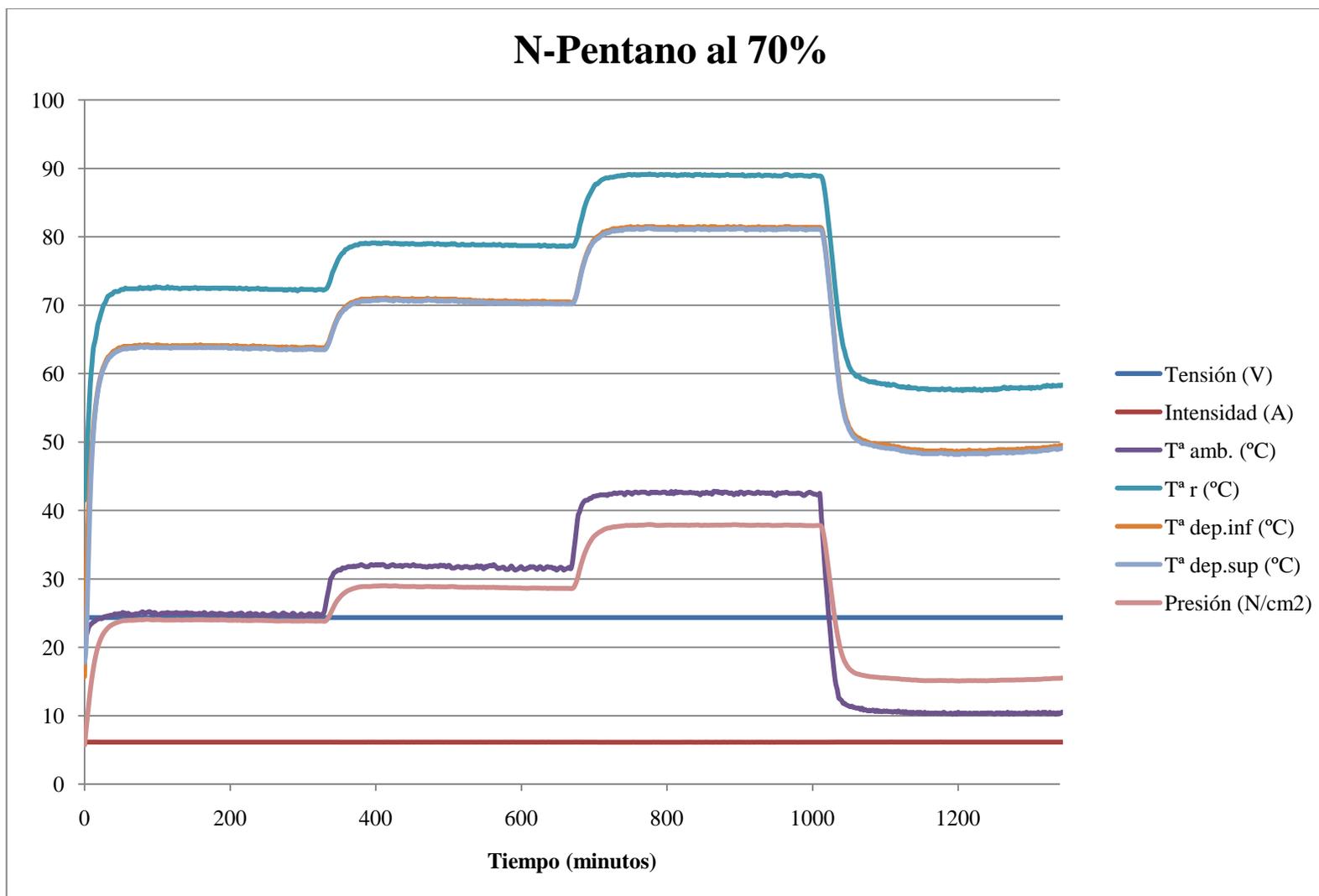


Gráfica A.12-10 Lecturas de las sondas del ensayo con N-hexano al 90%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón con 80° de inclinación.

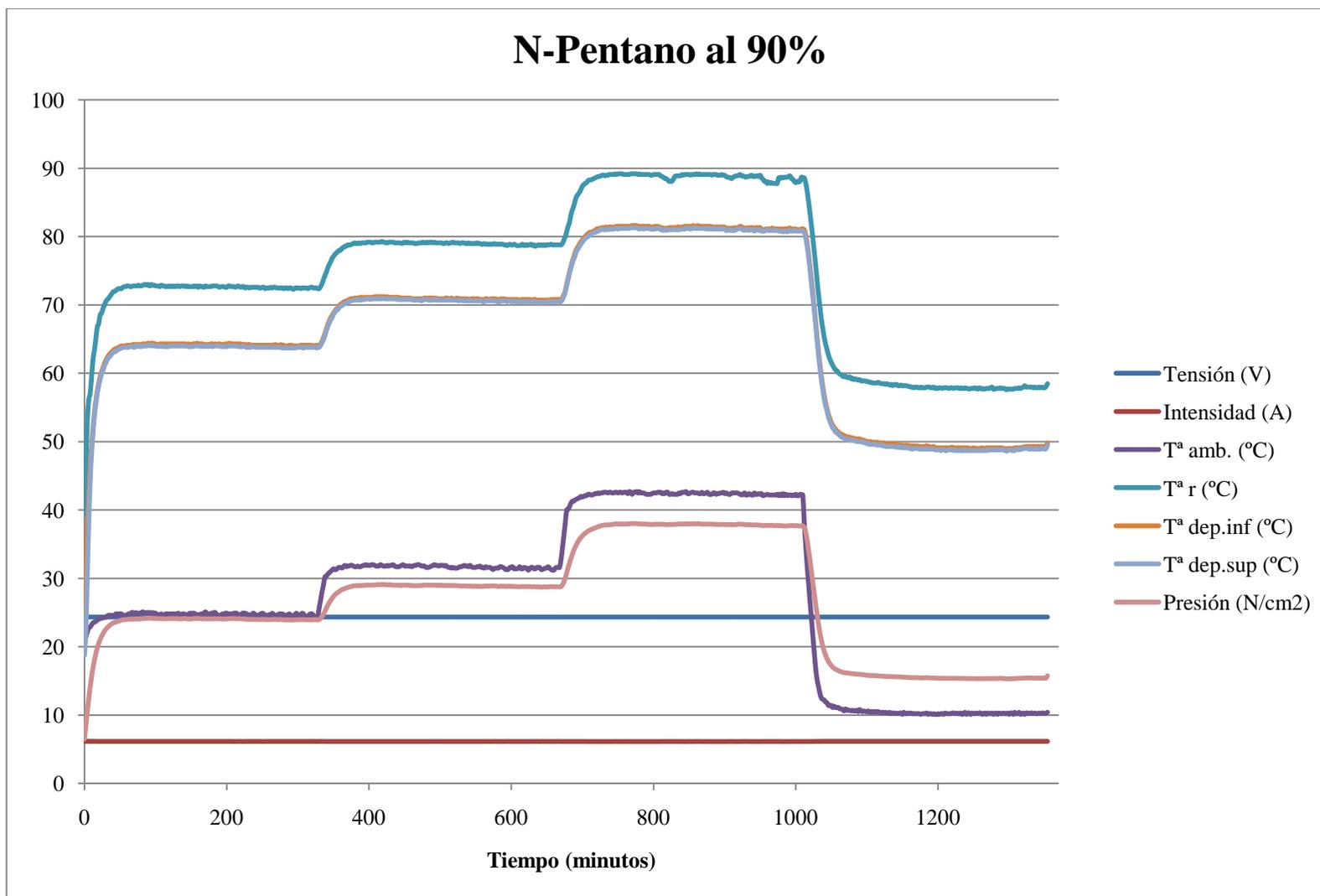
A.13 Lecturas con fluido de trabajo N-Pentano



Gráfica A.13-1 Lecturas de las sondas del ensayo con N-pentano al 50%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

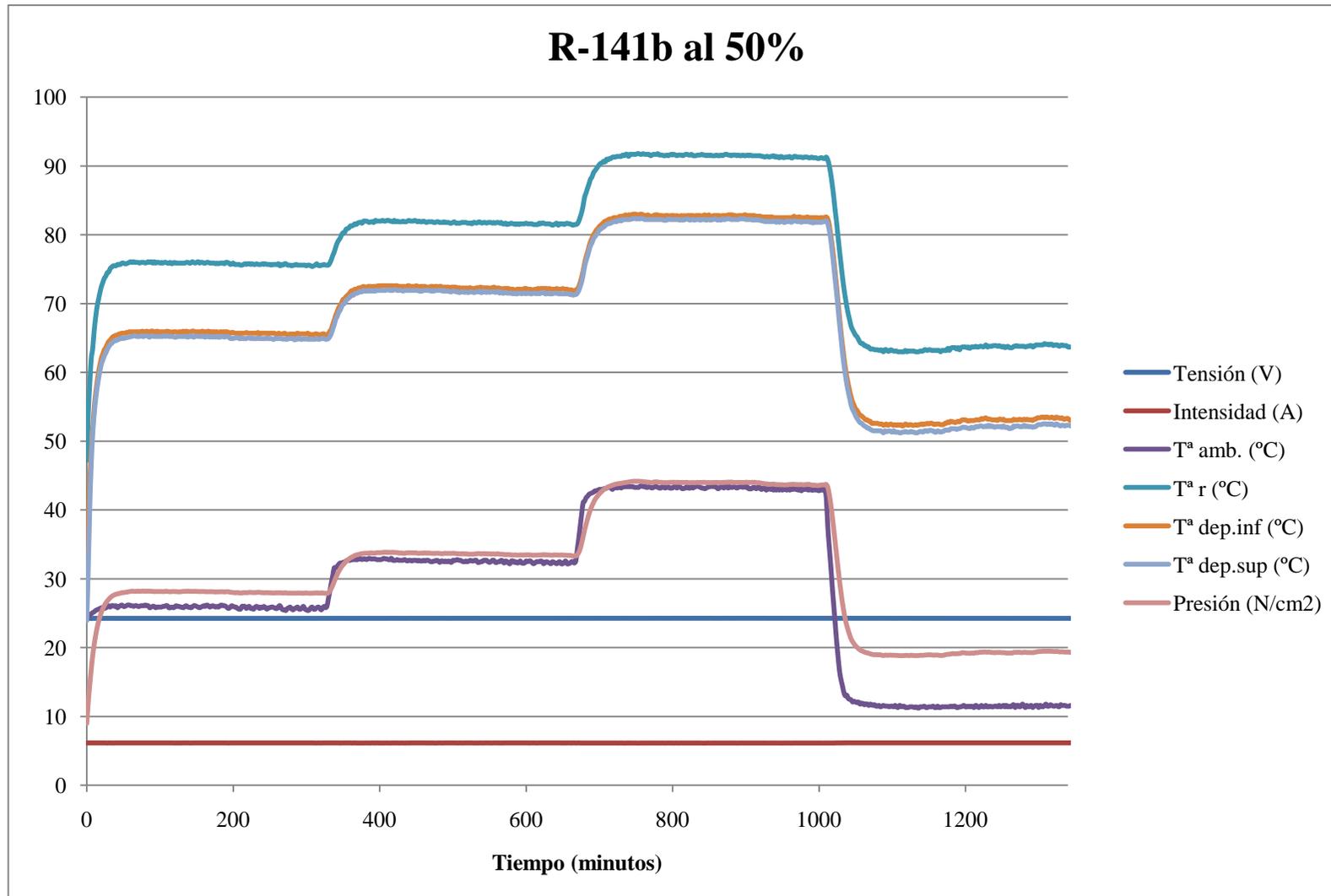


Gráfica A.13-2 Lecturas de las sondas del ensayo con N-pentano al 70%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

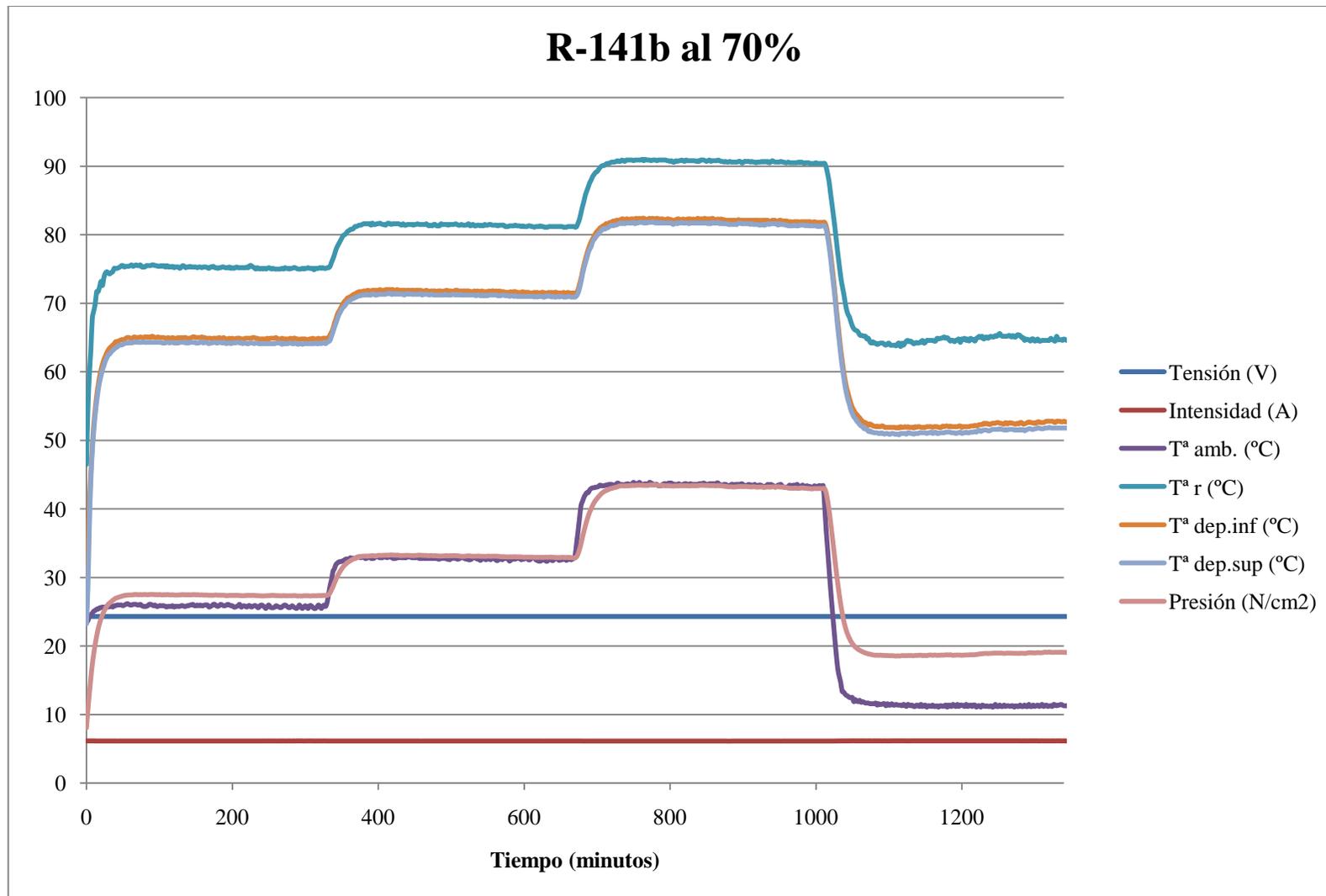


Gráfica A.13-3 Lecturas de las sondas del ensayo con N-pentano al 90%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

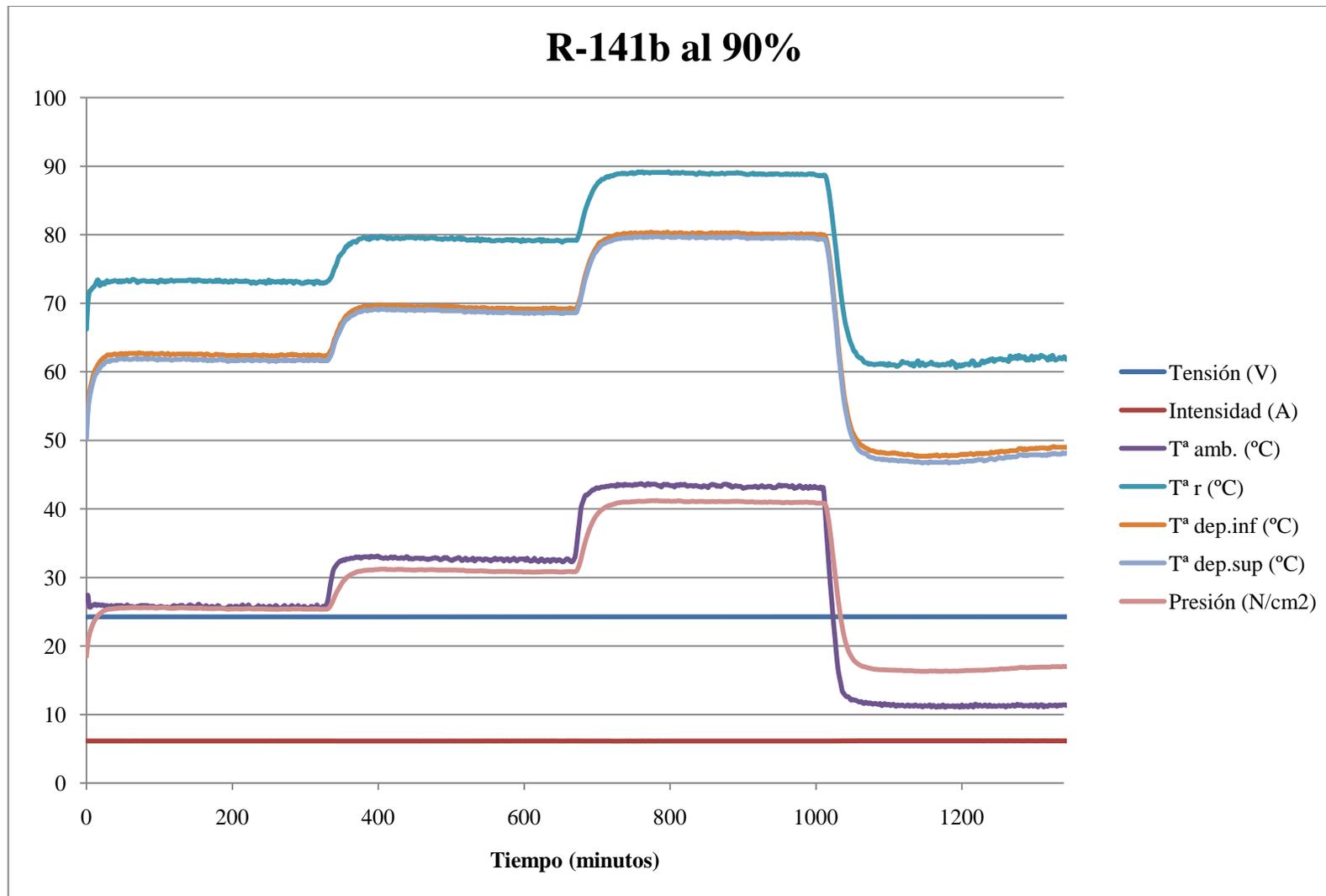
A.14 Lecturas con fluido de trabajo R-141b



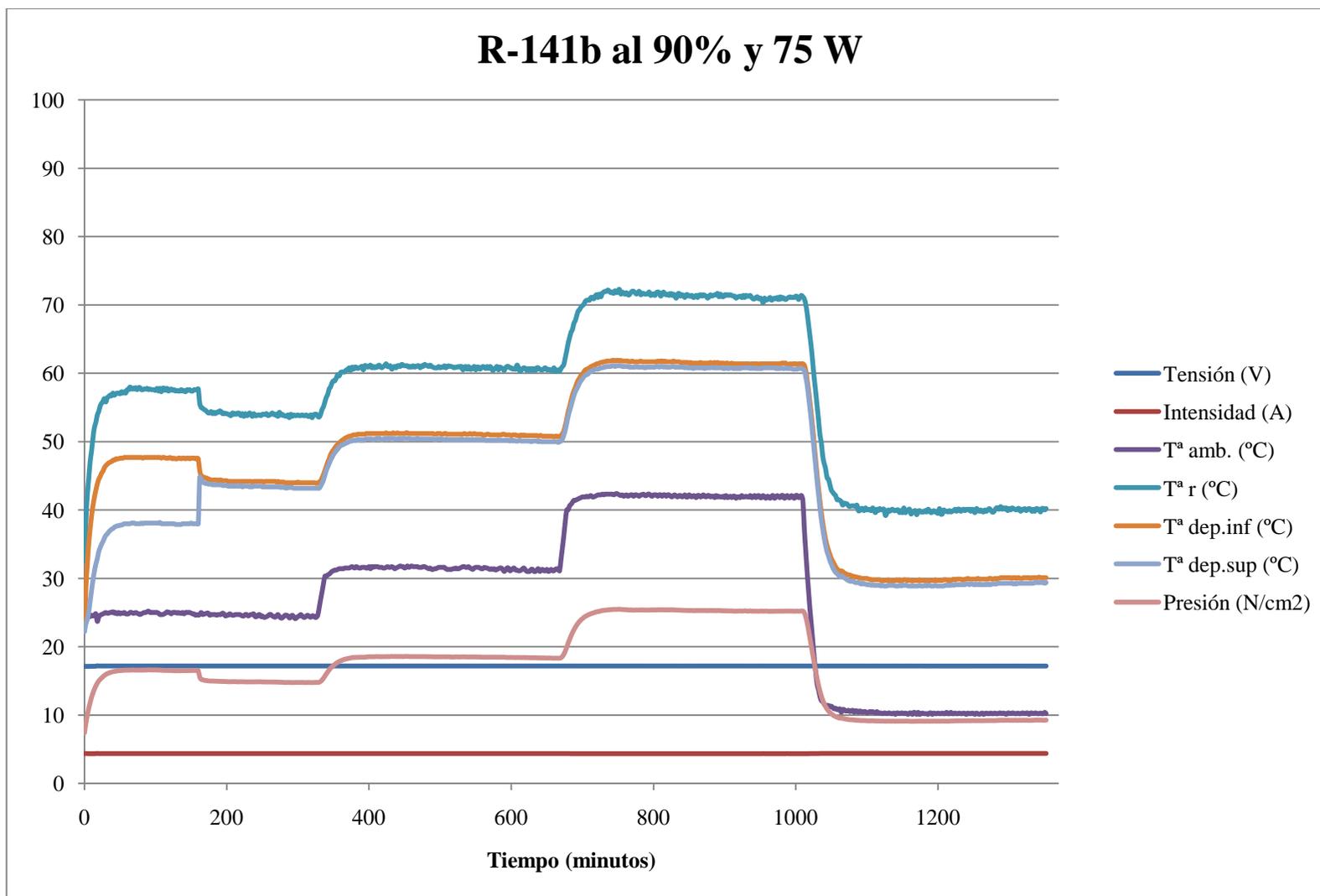
Gráfica A.14-1 Lecturas de las sondas del ensayo con R-141b al 50%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.



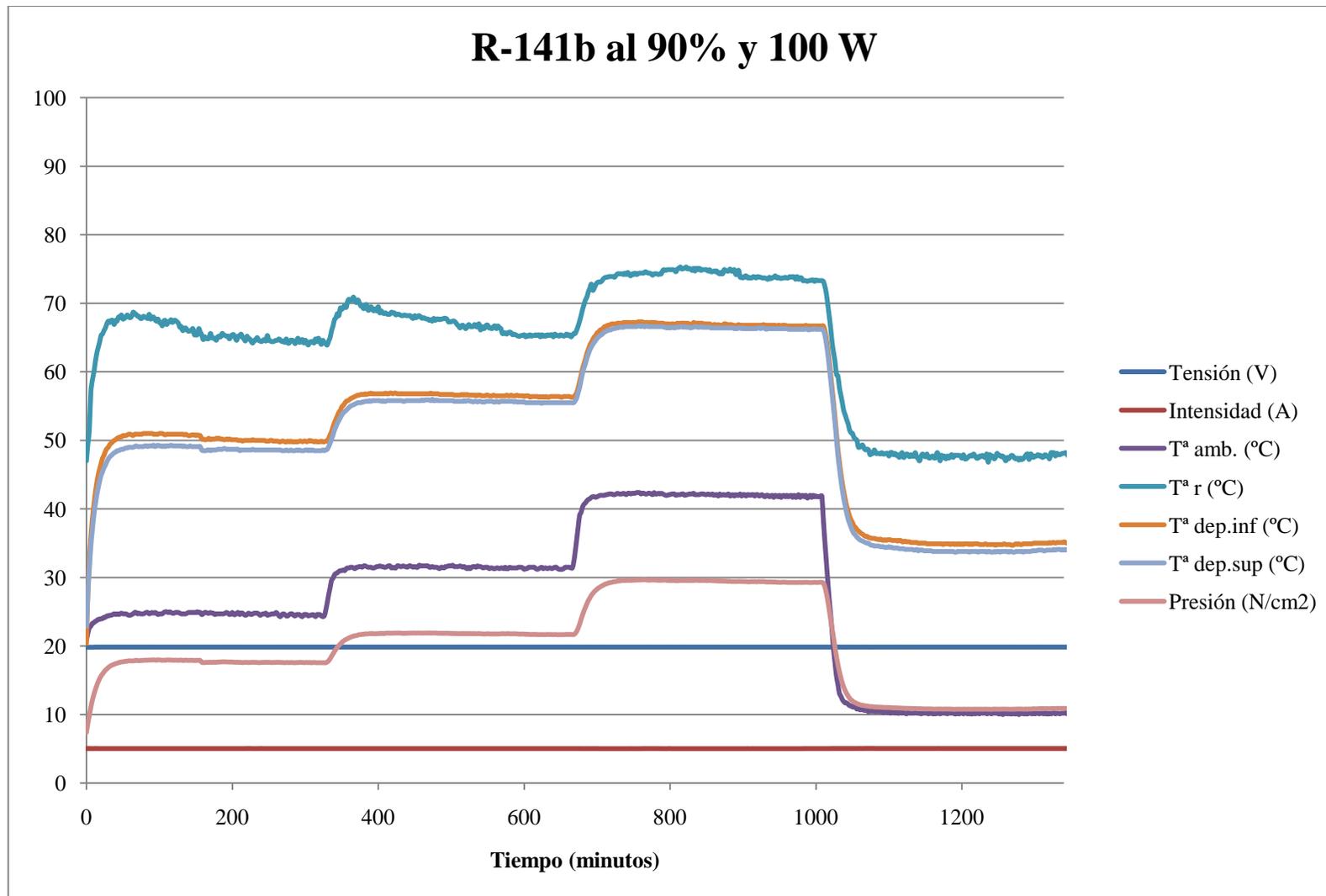
Gráfica A.14-2 Lecturas de las sondas del ensayo con R-141b al 70%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.



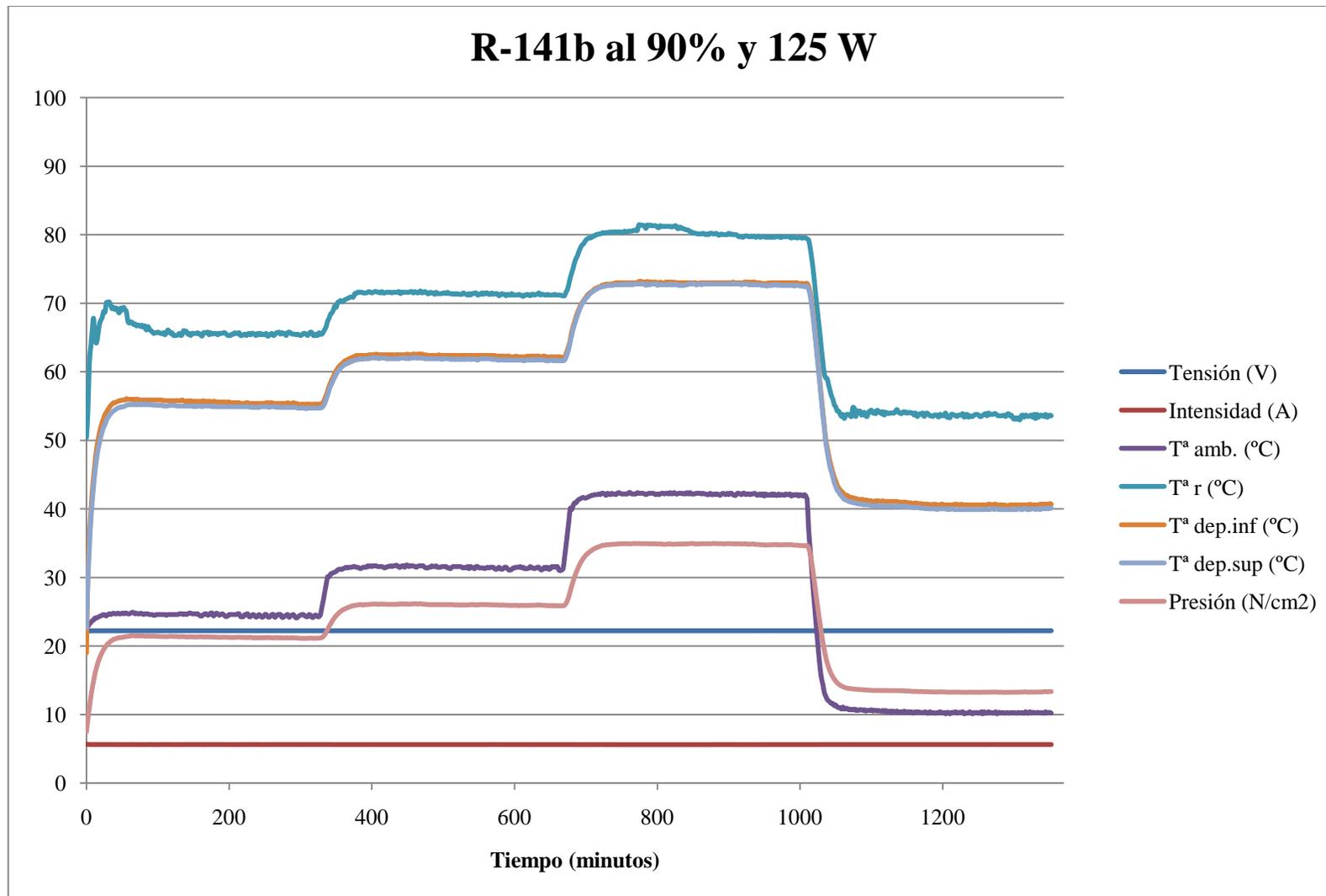
Gráfica A.14-3 Lecturas de las sondas del ensayo con R-141b al 90%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.



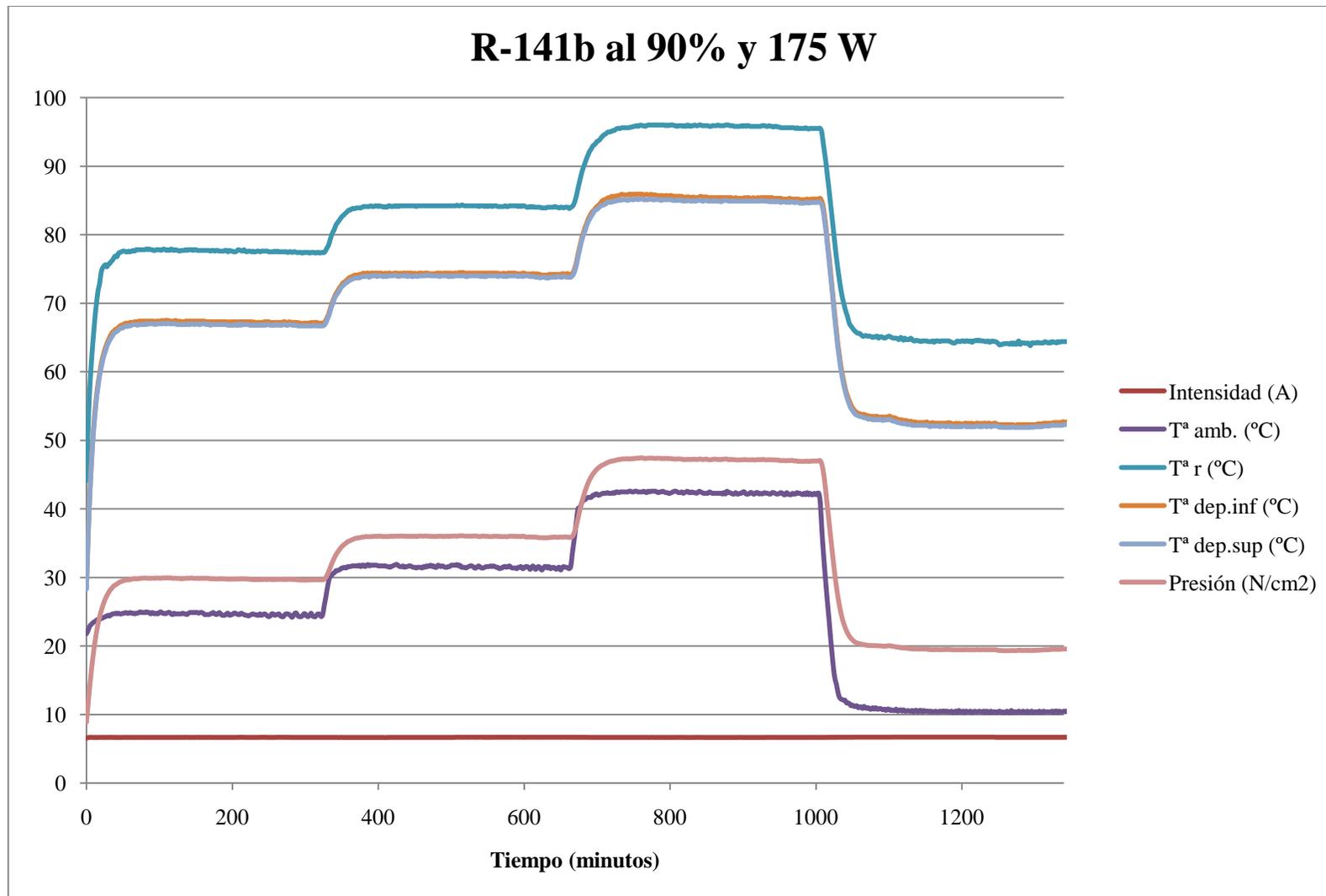
Gráfica A.14-4 Lecturas de las sondas del ensayo con R-141b al 90%, con 75 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.



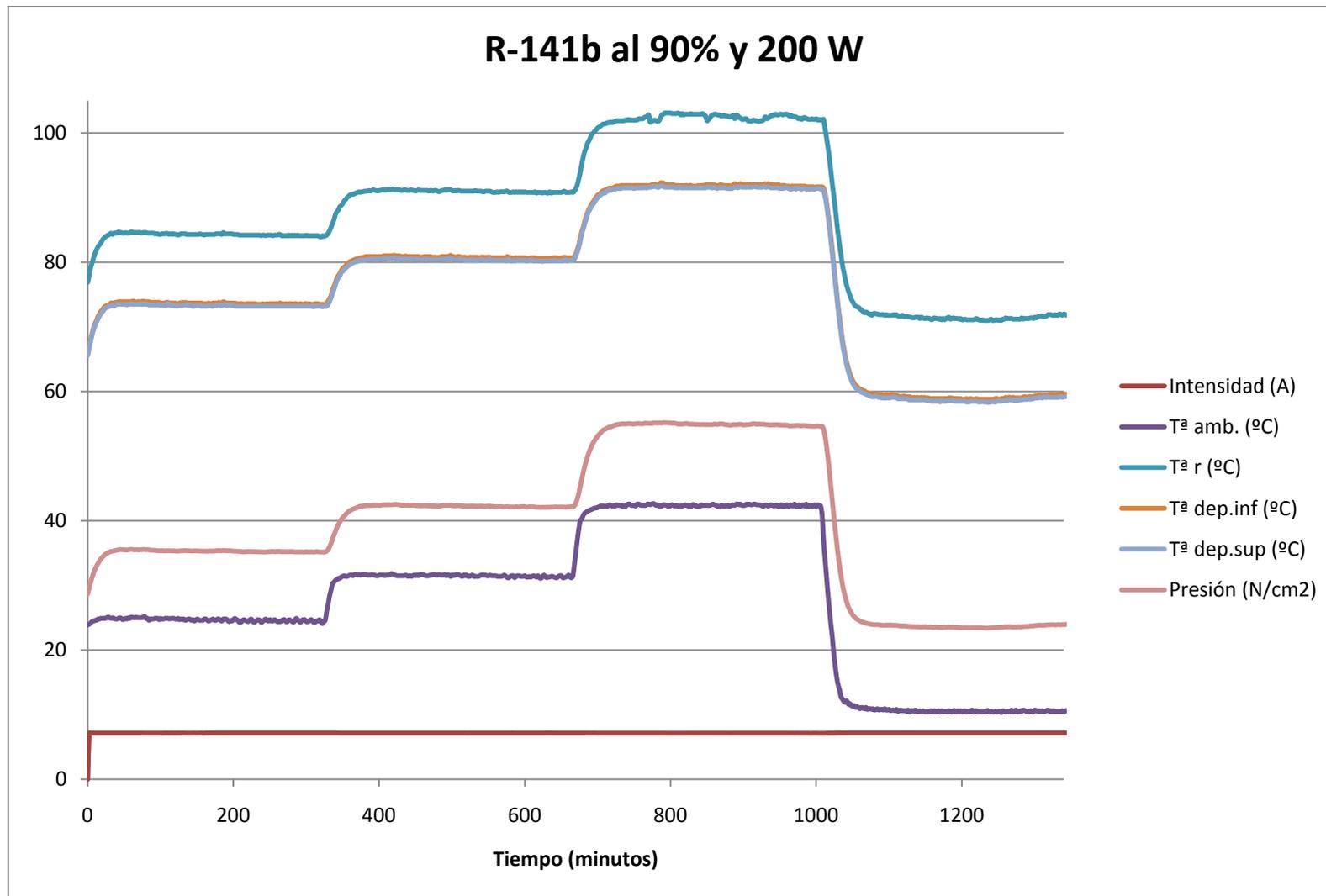
Gráfica A.14-5 Lecturas de las sondas del ensayo con R-141b al 90%, con 100 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.



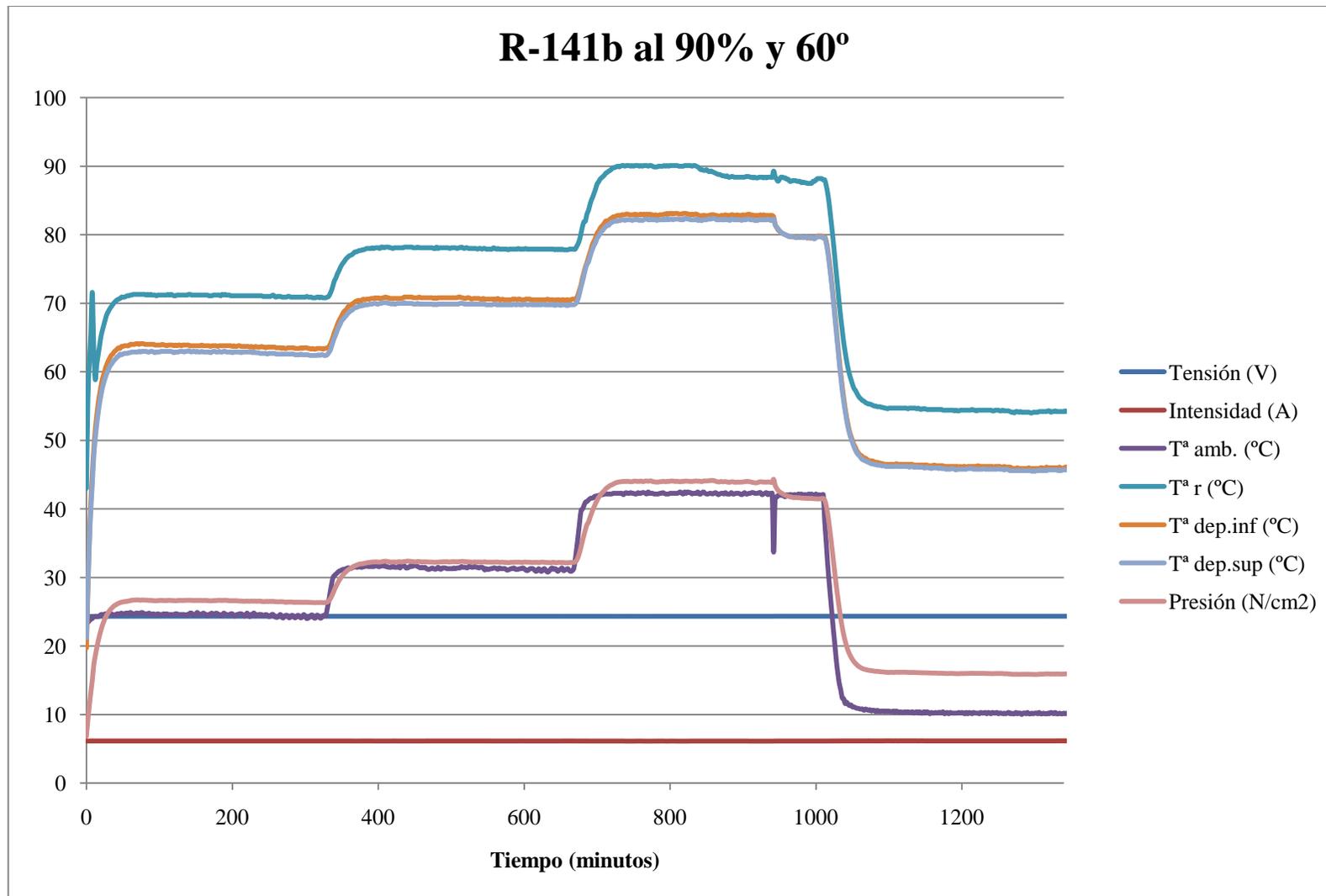
Gráfica A.14-6 Lecturas de las sondas del ensayo con R-141b al 90%, con 125 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.



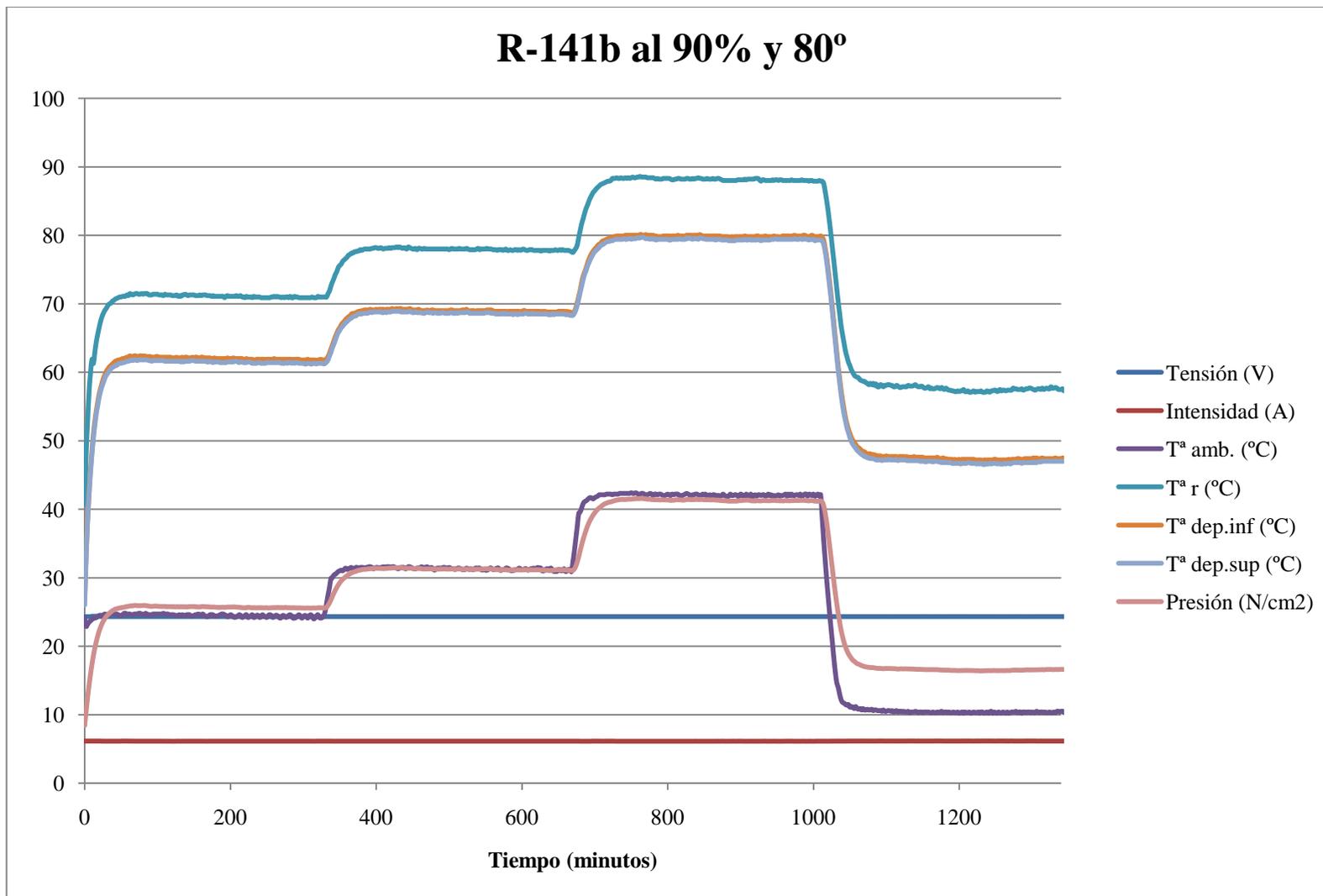
Gráfica A.14-7 Lecturas de las sondas del ensayo con R-141b al 90%, con 175 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.



Gráfica A.14-8 Lecturas de las sondas del ensayo con R-141b al 90%, con 200 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

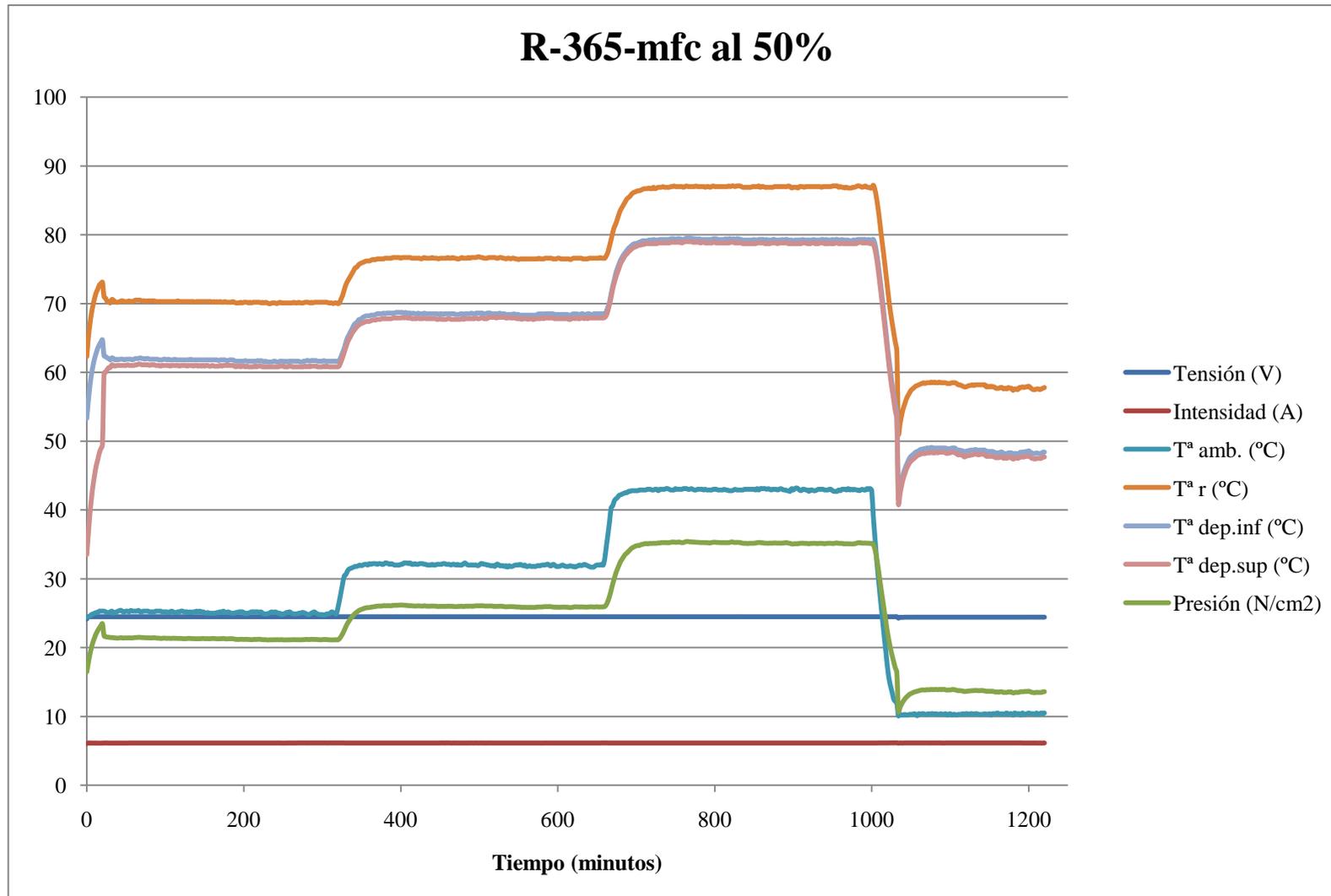


Gráfica A.14-9 Lecturas de las sondas del ensayo con R-141b al 90%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón con 60° de inclinación.

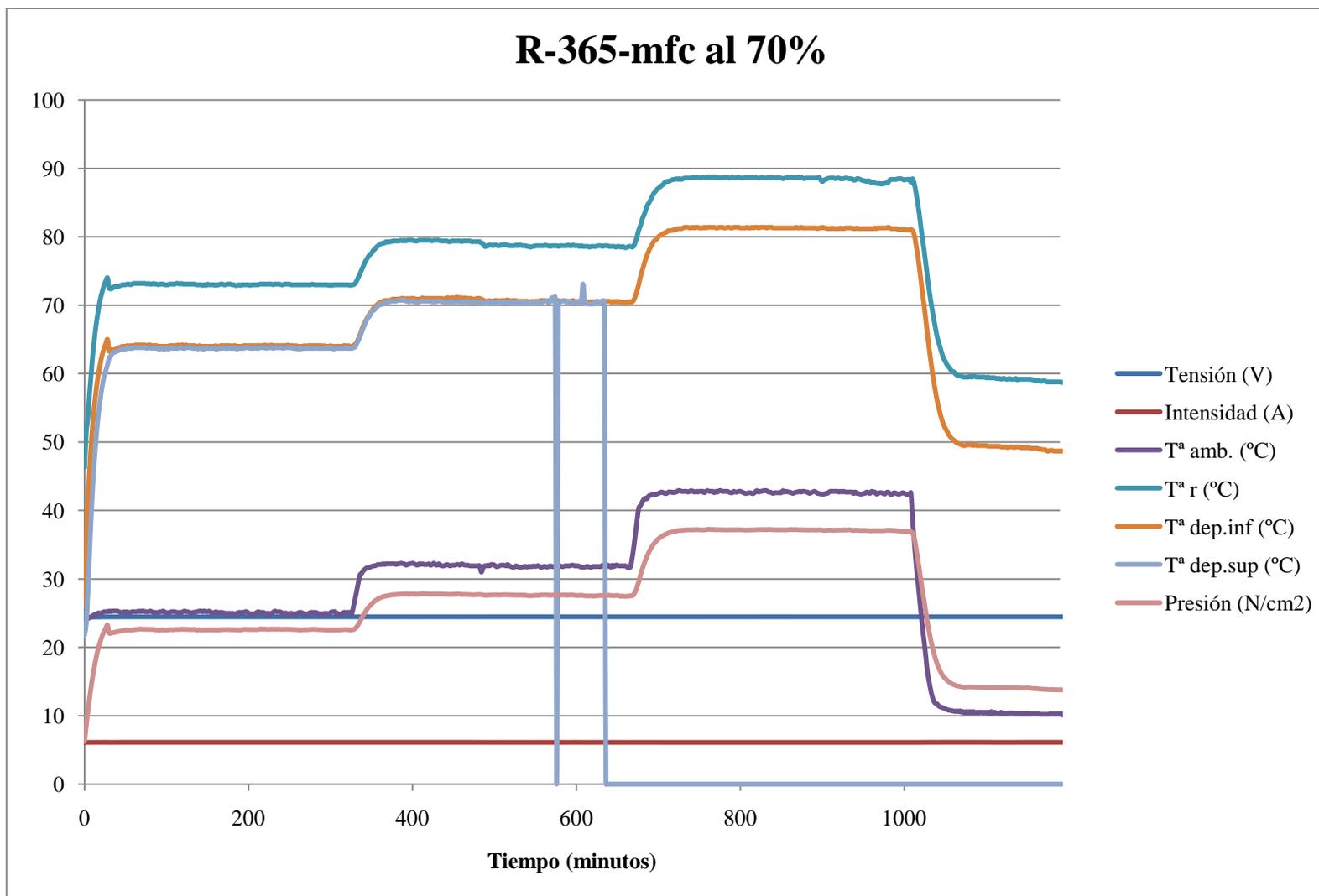


Gráfica A.14-10 Lecturas de las sondas del ensayo con R-141b al 90%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón con 80° de inclinación.

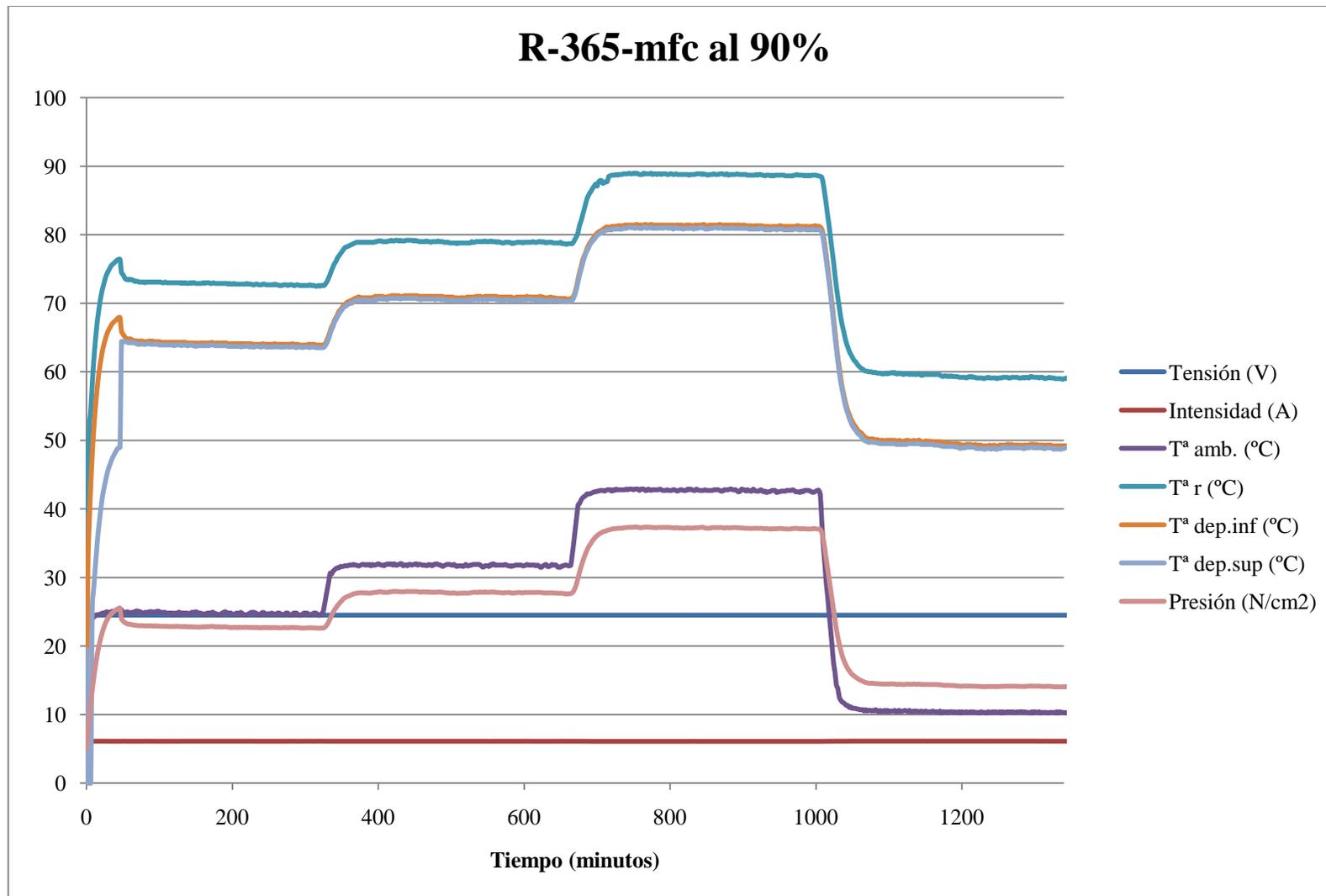
A.15 Lecturas con fluido de trabajo R-365-mfc



Gráfica A.15-1 Lecturas de las sondas del ensayo con R-365 al 50%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.



Gráfica A.15-2 Lecturas de las sondas del ensayo con R-365 al 70%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.



Gráfica A.15-3 Lecturas de las sondas del ensayo con R-365 al 90%, con 150 W de flujo de calor y el termosifón en posición vertical.

Pamplona, 29 de Junio de 2010.