

Universidad
Politécnica
de Cartagena



industriales
etsii UPCT

Estudio de la mejora de un colector solar térmico mediante inserción de muelles en espiral en los tubos del panel absorbedor.

Titulación: Ingeniero Técnico Industrial, esp. Química Industrial

Alumno/a: Francisco José Lorente Navarro

Director/a/s: Alberto García Pinar

Cartagena, Septiembre de 2011

i.-Agradecimientos.-

A mi director Alberto García, por su paciencia al ayudarme a enfrentarme a MATLAB, por su constancia cuando no salía ningún programa adelante, por su siempre desinteresada ayuda, y por el ánimo que me ha transmitido todo este tiempo, siempre con una sonrisa y mirando el futuro con optimismo.

A mis padres, porque sin su ayuda, no habría conseguido muchas metas en mi vida, y ésta ha sido una de ellas. Aunque el apoyo no parezca valorado, me ha hecho salir adelante en muchas ocasiones. Esto va por vosotros.

A mi hermana Miriam, que con su seriedad y su humor a partes iguales, me ha orientado en muchas ocasiones.

A mi hermano Pedro David, porque con su nobleza, alegría e ilusión por las cosas me ha hecho ver que este mundo no es tan oscuro.

A mis amigos y amigas, sin dejar a ninguno en el tintero, pero muy en particular a Juan Jesús Llorente, Juan Pedro García, Mariano Millán, Antonio Miguel Pérez y Jesús Menchón, porque en vosotros siempre he tenido un apoyo firme, en los mejores y en los peores momentos y porque sois como hermanos para mí, espero que así lo siga siendo siempre.

A mi compañero de aventuras en la UPCT y gran amigo, Arsenio J. Lasheras, por el apoyo mutuo, por los momentos todos buenos, por las tardes y noches de ese "equipo de estudio" y por los triunfos conseguidos, éste es uno más.

A mis compañeros de piso Antonio Porlán y Lázaro Campoy, porque cuatro años no quedan en nada y son muchos momentos vividos que no deben ser olvidados.

A ti, amigo Abel García Salinas, que en la recta final de este proyecto marchaste, tenía muchas cosas que contarte, un abrazo hermano, nos veremos al final del camino.

ii.- Índice.-

i.- Agradecimientos.-	3
ii.- Índice.-	5
iii.- Relación de figuras.-	9
iv.- Relación de tablas.-	13
v.- Lista de símbolos.-	15
vi.- Letras griegas.-	17
CAPÍTULO 1: LA ENERGÍA SOLAR FOTOTÉRMICA.....	19
1.1.- Introducción a la energía solar.-	20
1.1.1.- Un poco de historia...	20
1.1.2.- Obtención de energía a través del sol.-.....	21
1.2.- Energía solar fototérmica.-.....	23
1.2.1.- Conceptos sobre radiación solar.-	23
1.2.2.- Tipos de instalaciones solares fototérmicas.-	24
1.2.3.- Fluidos de trabajo.-.....	27
1.2.4.- Principio de funcionamiento.-	28
1.3.- Principales aplicaciones de la energía solar térmica.-	31
1.4.- Información tomada sobre colectores solares destinados a la generación de ACS.-	35
1.4.1.- Disposiciones más destacables del CTE para los captadores.- .	35
1.4.2.- Regímenes de situación de los captadores en las instalaciones.-	37
1.4.3.- Concepto de absorbedor, disposiciones de los absorbedores.-	39
1.4.4.- Condiciones a tener en cuenta en el diseño de los captadores solares térmicos.-	41

1.4.5.- Fluidos de trabajo empleados en las instalaciones.-.....	42
1.4.6.- Principales problemas que alteran el funcionamiento de los captadores solares.-	44
1.5.- Información obtenida sobre la situación actual de la energía solar térmica en España y en la CARM (Fuente: ARGEM)	46
1.5.1.- Estado actual de la energía solar en la CARM y en España.- ..	46
1.5.2.- Principales problemas a los que se enfrenta la energía solar térmica en la Región de Murcia.	48
1.5.3.- Proyecciones de futuro para la Energía solar térmica.	50
1.6.- Actuaciones del gobierno de la CARM.-	52
1.6.1.- Introducción. Resumen marco de actuaciones.-	52
1.6.2.- Campos de actuación en referencia a la energía solar térmica.- 52	
1.7.- Información obtenida del Código Técnico de la Edificación referente a instalación, uso y mantenimiento de colectores solares térmicos.-.....	54
1.7.1.- Introducción.-	54
1.7.2.- Resumen de las disposiciones más destacables.-	54
1.7.3.- Condiciones que han de cumplir las nuevas instalaciones.-	55
1.8.- Objeto del proyecto.-	64
1.9.- Fases del Proyecto.-	64
CAPÍTULO 2: MEJORAS EN INSTALACIONES DE ENERGÍA SOLAR TÉRMICA	65
2.1.- Introducción.-	66
2.2.- Técnicas de mejora de transmisión del calor.-	67
2.3.- Estudios de mejora de la transmisión de calor en colectores solares térmicos. Antecedentes del proyecto.-	69
2.3.1.- Kumar-Prasad.-	71
2.3.2.- Alireza Hobbi.-	72

2.3.3.- Jaisankar.-	74
2.4.- Experiencia del equipo investigador.-	75
2.5.- Mejoras consideradas por el equipo investigador.-	76
CAPÍTULO 3: COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL COLECTOR LISO.	79
3.1.- Introducción.-	80
3.2.- Modelo térmico de captadores lisos de parrilla.-	80
3.2.1.- Cálculo de pérdidas.-	84
3.3.- Desarrollo del modelo del captador solar liso en MATLAB.-	85
3.3.1.- Correlaciones de transmisión de calor en tubos lisos.-	86
3.4.- Obtención de curvas de eficiencia normalizadas para un captador comercial.-	88
3.4.1.- Datos del captador.-	89
3.4.2.- Obtención de curva de eficiencia normalizada.-	91
• Resultados de curva de eficiencia de 1er. Orden:.....	92
• Resultados de curva de eficiencia de 2º Orden:	93
3.5.- Estudio paramétrico de influencia de variables en la eficiencia del colector.-	95
3.5.1.- Influencia velocidad del viento (u) en la eficiencia del colector.-	96
3.5.2.- Influencia irradiancia (G) en eficiencia del colector.-.....	97
3.5.3.- Influencia caudal (q) en eficiencia del colector.-	98
3.5.4.- Influencia concentración en eficiencia del colector.-	99
CAPÍTULO 4: COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL COLECTOR MEJORADO. .	101
4.1.- Introducción.-	102
4.2.- Caracterización de los muelles. Parámetros.-.....	102

4.3.- Estudios anteriores sobre el uso de muelles en el panel absorbedor.-	104
4.4.- Correlaciones para la obtención de Nu para muelles.-	105
4.4.1.- Régimen laminar.-	105
4.4.2.- Régimen turbulento.-	105
4.4.3.- Régimen transitorio.....	106
4.5.- Desarrollo del modelo matemático en MATLAB para muelles.- ...	106
4.6.- Curvas de eficiencia normalizadas.-.....	107
4.7.- Estudio paramétrico-.....	110
4.7.1.- Influencia de la velocidad del viento.-.....	110
4.7.2.- Influencia concentración PPG.....	111
4.7.3.- Estudio influencia del caudal.-	113
4.7.4.- Estudio paramétrico del comportamiento de los muelles para un barrido de variables características.-	116
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES FINALES Y TRABAJOS FUTUROS	119
5.1.1.- Conclusiones finales.-.....	120
5.1.2.- Trabajos futuros.-	121
ANEXO I: CÓDIGO MATLAB PARA EL DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO CON TUBO LISO.	123
ANEXO II: DESARROLLO DEL CÓDIGO MATLAB PARA EL MODELO MATEMÁTICO CON MUELLES INSERTADOS.	129
ANEXO III: RELACIÓN DE CURVAS DE EFICIENCIA PARA LOS DISTINTOS MUELLES INSERTADOS	135
ANEXO IV: BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA.	169

iii.- Relación de figuras.-

Fig. 1: Instalación de tipo termosifón directo. (Fuente: Sodean, S.A)	25
Fig. 2: Instalación de flujo indirecto de tipo forzado. (Fuente: Sodean, S.A)	25
Fig. 3: Instalación de flujo indirecto de tipo termosifón. (Fuente: Sodean, S.A)	26
Fig. 4: Porcentaje de propilenglicol en peso. (Fuente: Sodean, S.A.)	27
Fig. 5: Depósitos acumuladores. (Fuente: Registro CDT)	28
Fig. 6: Vista interior de un depósito acumulador (Fuente: Registro CDT)	29
Fig. 7: Imagen de un vaso de expansión. (Fuente: Registro CDT)...	30
Fig. 8: Esquema de instalación de ACS aplicada a viviendas (Fuente: Solclima).....	31
Fig. 9: Circuito del ACS para obtención de calefacción y agua para consumo. (Fuente: Registro CDT).....	32
Fig. 10: Circuito del ACS incorporando la climatización de una piscina. (Fuente: Registro CDT)	33
Fig. 11: Esquema de proceso para obtención frío a través de radiación solar (Fuente: ARGEM).....	34
Fig. 12: Máquina de absorción. Casa comercial "Rotartica". (Fuente: ARGEM)	35
Fig. 13: Conexión de captadores en paralelo mediante conductos externos. (Fuente: Sodean).....	38
Fig. 14: Conexionado de captadores en paralelo mediante conductos internos. (Fuente: Sodean).....	38

Fig. 15: Conexión de captadores en serie. (Fuente: Sodean).....	39
Fig. 16: Colector tipo parrilla (Fuente: Registro CDT)	40
Fig. 17: Colector tipo serpentín (Fuente: Artículo Kumar-Prasad)..	41
Fig. 18: Ilustración de la orientación de los colectores (Fuente: Registro CDT).....	42
Fig. 19: Áreas de explotación de energía solar térmica realizadas (azul) y esperadas (rojo) en la CARM. Fuente: Argem.....	46
Fig. 20: Resultados esperados para 2010 y datos obtenidos hasta 2006 sobre áreas de explotación totales de energía solar térmica en la CARM. Fuente: Argem.....	48
Fig. 21: Mapa representativo de las zonas climáticas del territorio español. (Fuente CTE)	56
Fig. 22: Imagen ilustrativa de las variables físicas que intervienen en el modelo matemático (Fuente: Art. Eisenmann)	80
Fig. 23: Expresión del cálculo de pérdidas de calor por el fondo del captador.	84
Fig. 24: Curva comparativa para validación modelo 1er. Orden.	92
Fig. 25: Gráfica comparativa para validación modelo 2º orden.	93
Fig. 26: Influencia u sobre eficiencia del colector.	96
Fig. 27: Influencia G sobre eficiencia del colector.....	97
Fig. 28: Influencia caudal sobre eficiencia del colector.....	98
Fig. 29: Influencia concentración PPG sobre eficiencia del colector.	99
Fig. 30: Representación gráfica parámetros caracterización del muelle (Imagen tesis doctoral A. García, 2006).....	103
Fig. 31: Curva de eficiencia normalizada del colector para un ED de 0.074.	108
Fig. 32: Curva de eficiencia normalizada para un ED = 0.1	108

Fig. 33: Curva de eficiencia para ED = 0.074 y u = 3.....	110
Fig. 34: Curva de eficiencia para ED = 0.074 y 0% PPG.	111
Fig. 35: Curva de eficiencia para ED = 0.074 y 60% PPG.....	112
Fig. 36: Curva de eficiencia para ED = 0.074 y q=30 l/h·m ²	114
Fig. 37: Curva de eficiencia para ED = 0.074 y q=60 l/h·m ²	114
Fig. 38: Influencia de la velocidad del viento para muelle M01.....	116
Fig. 39: Influencia del barrido de caudales para M01.....	117
Fig. 40: Influencia del barrido de concentraciones para M01.	118

iv.- Relación de tablas.-

Tabla 1: Tipos de instalaciones más empleadas.	24
Tabla 2: Operaciones a realizar sobre los captadores con la frecuencia determinada (IV indica inspección visual).....	36
Tabla 3: Operaciones de mantenimiento de los captadores solares y sus periodos máximos de revisión (IV indica inspección visual)...	37
Tabla 4: Representación zonas climáticas por poblaciones en la CARM (Fuente CTE)	57
Tabla 5: Representación de intervalos de H en las zonas climáticas de la CARM.....	57
Tabla 6: Contribución solar mínima en % para caso 1.	58
Tabla 7: Contribución solar mínima en % para caso 2.	59
Tabla 8: Criterios de demanda de ACS en base a las principales aplicaciones de las instalaciones.....	60
Tabla 9: Pérdidas límite.	63
Tabla 10: Datos de la instalación.	89
Tabla 11: Valores ajuste lineal para el colector del fabricante.	90
Tabla 12: Valores ajuste 2º orden para el colector del fabricante. 90	
Tabla 13: Valores a analizar en la validación del modelo de 1er. Orden. 91	
Tabla 14: Barrido de variables a tomar en validación curva 2ºorden. 91	
Tabla 15: Comparativa valores obtenidos/valores Fabricante para recta 1er. Orden.....	92

Tabla 16: Comparativa valores obtenidos/valores Fabricante para curva 2ºorden.....	94
Tabla 17: Valores de las variables en el punto de funcionamiento definido.	95
Tabla 18: Rango de valores a tomar en el estudio del modelo liso.	95
Tabla 19: Diferencia de valores de u para rectas de eficiencia respecto recta dada por el fabricante.	96
Tabla 20: Diferencia de valores de G para rectas de eficiencia respecto a la recta del fabricante.....	97
Tabla 21: Diferencia de valores de caudal para rectas de eficiencia respecto a la recta Del fabricante.	98
Tabla 22: Diferencia de valores de concentración para rectas de eficiencia respecto a la recta del fabricante.....	99
Tabla 23: Parámetros característicos de los muelles a emplear en el modelo.	107
Tabla 24: Valores ajuste primer orden para muelles de ED = 0.074	109
Tabla 25: Valores ajuste primer orden para muelles de ED = 0.1	109
Tabla 26: Diferencias máxima y mínima entre valores de eficiencia para u=3 y ED=0.074.....	110
Tabla 27: Rangos de valores de Re para Tm*=0 y Tm*=0-085..	113
Tabla 28: Rangos de valores de Re para Tm*=0 y Tm*=0-085..	115

v.- Lista de símbolos.-

a_1, a_2	Coeficientes de pérdidas del ajuste.	-
A_A	Área de absorbedor del captador.	m^2
B	Espesor del captador.	m
Bi	Número de Biot.	-
C	Parámetro de ecuación de pérdidas de Klein.	-
c	Parámetro de conductancia en el contacto aleta/tubo.	-
C_f	Capacidad calorífica del fluido conductor	J/KgK
D_i	Diámetro interior del tubo.	M
e/d	Cociente espesor entre diámetro del muelle.	-
f	Relación resistencia térmica externa/interna.	-
F	Factor de eficiencia de la aleta.	-
F'	Factor de eficiencia local del colector (elemento dl).	-
F_R	Factor de remoción.	-
g	Amplitud de la soldadura (zona contacto tubo-aleta).	m
g_d	Conductividad térmica de la soldadura.	W/mK
G	Irradiación solar incidente global.	W/m^2
g_t	Gravedad terrestre.	m/s^2
G_z	Número de Graetz.	-
h_0	Factor óptico (eficiencia en colector para $T_m^*=0$).	-
h_f	Coeficiente transf. Calor del fluido.	W/m^2K
h_w	Coef. Transf. Calor debido al viento en cubierta.	W/m^2K
k_{abs}	Conductividad térmica del absorbedor.	W/mK

$k_{aislante}$	Conductividad térmica del aislante.	W/mK
k_f	Conductividad térmica fluido conductor.	W/mK
k_{gd}	Coef. de trans. calor entre zona contacto/tubo.	W/mK
k_{gf}	Coef. Trans. Calor entre fluido y zona de contacto	W/m ² K
k_{tubo}	Conductividad térmica del tubo.	W/mK
L	Longitud de tubería.	M
m	Parámetro para cálculo F.	-
N	Número de vidrios del colector.	-
Nu	Número de Nusselt.	-
Nu_{lam}	Número de Nusselt régimen laminar.	-
Nu_{turb}	Número de Nusselt régimen turbulento.	-
p/d	Cociente paso entre diámetro del muelle.	-
p/e	Cociente paso entre espesor del muelle.	-
Pr	Número de Prandtl.	-
Re	Número de Reynolds.	-
Re_c	Número de Reynolds crítico (paso laminar a transición)	-
Q	Potencia útil extraída del captador.	W
T_a	Temperatura ambiente.	°C
\overline{T}_{abs}	Temperatura del absorbedor.	°C
T_{in}	Temperatura de entrada al captador.	°C
t_m	Temperatura media del fluido de transf. Calor.	K
T_m^*	Diferencia de temperatura reducida.	m ² K/W
T_e	Temperatura de salida del captador.	°C
S	Energía solar absorbida por el colector.	W/m ²

S_{∞}	Factor de forma.	-
u	Velocidad del aire (norma UNE-EN 12975-2).	m/s
U_B	Coeficiente de pérdidas del fondo del colector.	W/m ² K
U_{BE}	Coef. Pérdidas combinado fondo/laterales colector.	W/m ² K
U_T	Coef. Pérdidas de calor por parte superior captador.	W/m ² K
U_E	Coef. Pérdidas de calor por laterales captador.	W/m ² K
U_L	Coef. Global de pérdidas de calor.	W/m ² K
V	Velocidad del fluido.	
w	Anchura aleta o espaciado entre tubos.	m
W	Anchura total placa absorbadora.	M
x^*	Longitud adimensional.	

vi.- Letras griegas.-

a_{abs}	Absortancia del absorbador.	-
β	Angulo inclinación respecto a la horizontal.	(°)
δ_{abs}	Espesor placa absorbador.	m
δ_{aisl}	Espesor capa aislante.	m
δ_{tubo}	Espesor tubo.	M
ε_g	Emitancia cubierta transparente.	-
ε_{abs}	Emitancia del absorbador.	-
η_d	Eficacia aleta tubo.	-
η	Eficiencia del colector.	-
μ	Viscosidad dinámica fluido conductor.	Pa·s
μ_d	Parámetro tipo Biot.	-

ρ_f	Densidad fluido contacto.	Kg/m ³
π	Número Pi.	
σ	Constante de Stefan-Boltzmann.	W/m ² K ⁴
τ_g	Transmitancia cubierta transparente.	-

CAPÍTULO 1: LA ENERGÍA SOLAR FOTOTÉRMICA.

1.1.- Introducción a la energía solar.-

1.1.1.- Un poco de historia...

Desde muy antiguo, el hombre ha obtenido de la naturaleza todo aquello que le es necesario en su día a día, aprovechando los recursos que, en base al lugar geográfico donde resida serían unos u otros. Conforme al paso del tiempo, el hombre ha ido evolucionando el concepto de obtención de recursos de la naturaleza y aumentando la calidad de vida, consiguiendo que, a través de materias primas, y a través de procesos de transformación donde proceda, se puedan obtener recursos tanto materiales como energéticos.

Tras la 2ª revolución industrial, en torno a finales del siglo XIX, la obtención de energía fue vital para el buen funcionamiento de la industria (incipiente por aquel entonces), y se tomó como fuente de energía mayoritaria el carbón. Conforme al paso del tiempo se observó que pese a ser una fuente de energía competente, no era inagotable, por lo que se tuvo que recurrir a nuevas fuentes de energía que pudieran suplir al carbón en la mayoría de lo posible. Para ello, a lo largo del primer tercio y mediados del siglo XX se obtendrá una nueva fuente de energía más versátil y con mayores aplicaciones que la combustión: el petróleo.

Con el uso del petróleo como materia prima se consiguió del mismo extraer gran cantidad de compuestos que hasta hoy día forman parte de la rutina diaria. Combustibles para maquinaria y vehículos, gas natural, plásticos, parte de los textiles entre otros muchos ejemplos son tomados del petróleo.

Nuevamente, la humanidad se tuvo que enfrentar a otra dura realidad de índole similar a la del carbón, y sucede que el petróleo tampoco es una fuente de energía inagotable. Este hecho era ya bien sabido por los explotadores de ésta materia prima, pero no tomaron conciencia hasta que comenzaron a surgir los primeros problemas de carestía de la misma, y en su consecuencia, el encarecimiento de los precios. Esto llevó en el año 1973 a la primera "*crisis del petróleo*", en la cual se produjo un encarecimiento considerable en base a su escasez incipiente.

Conforme al paso de los años, los productos derivados del petróleo así como la energía que de él deriva ha experimentado un encarecimiento considerable que mueve a los investigadores a la búsqueda de fuentes de "energías alternativas" o también denominadas "energías renovables".

Recientemente, la posesión de petróleo se ha convertido en símbolo casi de poder y hoy día genera contiendas y acritudes entre los países exportadores y los principales consumidores. Este último hecho refleja con claridad la necesidad de una vía alternativa, inagotable y no contaminante. Una de estas posibles vías es la obtención de energía a través del sol.

1.1.2.- Obtención de energía a través del sol.-

Una vez que la sociedad toma conciencia de la necesidad de obtener energías de forma alternativa, se observa que la energía que aporta el sol puede ser aprovechada para usos domésticos e industriales, gracias al gran aporte energético que suministra diariamente.

El aprovechamiento de la energía solar, en base a las investigaciones realizadas hasta la fecha se puede realizar de dos maneras destacables:

- Obtención de energía eléctrica a través del sol: *Vía fotovoltaica.*
- Obtención de energía térmica a través del sol: *Vía fototérmica.*

La energía obtenida a través del sol se obtiene a través de unos dispositivos denominados captadores. Estos aparatos constan de una serie de placas de tono generalmente oscuro (como es sabido, los colores oscuros absorben más la radiación solar), y que generalmente están constituidos de materiales semiconductores de silicio. Estos captadores generalmente suelen ir acompañados de una capa de material antirreflejante para evitar que se refleje parte de la radiación y sea en su mayor parte absorbida por los captadores. Una vez captada la radiación solar se procede a su aplicación según convenga. Para ello, anteriormente hemos citado las dos formas mayoritarias de aprovechamiento de energía, de las que citamos algunos detalles a continuación.

Las celdas solares *fotovoltaicas*, una vez que captan la energía del sol, la dirige hacia unas baterías en las que se transforma la energía tomada en un voltaje proporcional a la radiación tomada, obteniendo así energía eléctrica que puede ser aprovechada para usos domésticos e industriales.

Por otro lado, los captadores solares *fototérmicos* pretenden aprovechar la energía térmica del sol para calentar. De ésta forma, la energía tomada de los captadores calienta unas tuberías interiores al mismo por las que circula un fluido que es calentado. Generalmente los captadores fototérmicos son empleados para calentar agua y obtener agua caliente sanitaria (en adelante ACS).

La línea de investigación de éste proyecto fin de carrera, se centrará en presentar mejoras en las tuberías de los colectores fototérmicos a fin de obtener un mayor aprovechamiento energético de la radiación solar y un mayor rendimiento en los sistemas de captadores fototérmicos.

Un aliciente más para el desarrollo de las investigaciones descritas versará en la reciente reforma del *código técnico de la edificación* (CTE), por el cual se establece que toda edificación de nueva construcción deberá ser dotada de dispositivos captadores de energía solar, pretendiendo así obtener hasta un 70% de la ACS total consumida a través de éstos dispositivos.

1.2.- Energía solar fototérmica.-

La energía solar fototérmica, tal como se ha indicado anteriormente, se centra en la captación de la energía térmica ofrecida por el sol para calentar un fluido, generalmente agua.

1.2.1.- Conceptos sobre radiación solar.-

Se deberá destacar, antes de explicar cualquier concepto sobre instalaciones solares en detalle, que en la zona mediterránea donde preferentemente se investigará, las condiciones climatológicas permiten ampliamente y sin suponer problema alguno la instalación de dispositivos de captación solar, de los cuales su aprovechamiento puede encontrarse cercano al máximo, permitiendo al sureste español un considerable ahorro energético empleando estos colectores solares.

Se considera, a continuación, los tipos de radiación existentes:

- Radiación *directa*: Es aquella que alcanza la superficie terrestre directamente desde el sol.
- Radiación *difusa*: Dícese del tipo de radiación solar obtenida a través de formas indirectas tal como la radiación obtenida a través de las nubes y otras interacciones de la radiación solar con los componentes atmosféricos.

Se definen también, los conceptos de irradiancia e irradiación.

Se considera *irradiancia* a la potencia de la radiación solar por unidad de área, mientras consideramos *irradiación* a la energía obtenida por unidad de área en los captadores.

En resumen, todo concepto relacionado con la radiación solar, se asociará inmediatamente a los colectores, pues de ellos se pretende recoger y aprovechar el máximo de radiación posible.

Para un mayor aprovechamiento de la radiación solar, los colectores deben de absorber la mayor cantidad de radiación posible, reflejando la mínima y difundiendo también la menor radiación en la superficie del captador. Para ello, a los captadores se les proveerá de una capa antirreflejante y de tonalidades oscuras para captar mejor la radiación solar en todas sus formas posibles.

La orientación del captador es otro aspecto no menos importante, considerando, para estas latitudes, orientar los colectores hacia el sur, confiriéndoles ángulos en torno a los 30° de inclinación. Ésta inclinación puede ser cambiada para obtener un mayor aprovechamiento de la radiación solar en una determinada época del año u otra.

1.2.2.- Tipos de instalaciones solares fototérmicas.-

Los captadores solares para la obtención de agua caliente sanitaria pueden ser de diversos tipos. En la siguiente tabla, se especifican las instalaciones más empleadas actualmente:

Forma circulación del fluido	Forma transferencia del calor
Termosifón	Directo
	Indirecto
Circulación forzada	Directo
	Indirecto

Tabla 1: Tipos de instalaciones más empleadas.

La *circulación por termosifón* se centra en la circulación natural del fluido en base a la temperatura que adquiere. A mayor temperatura, el fluido caliente tenderá a ascender y a circular por los conductos antes que el fluido frío, más pesado y con menor tendencia a circular de forma natural.

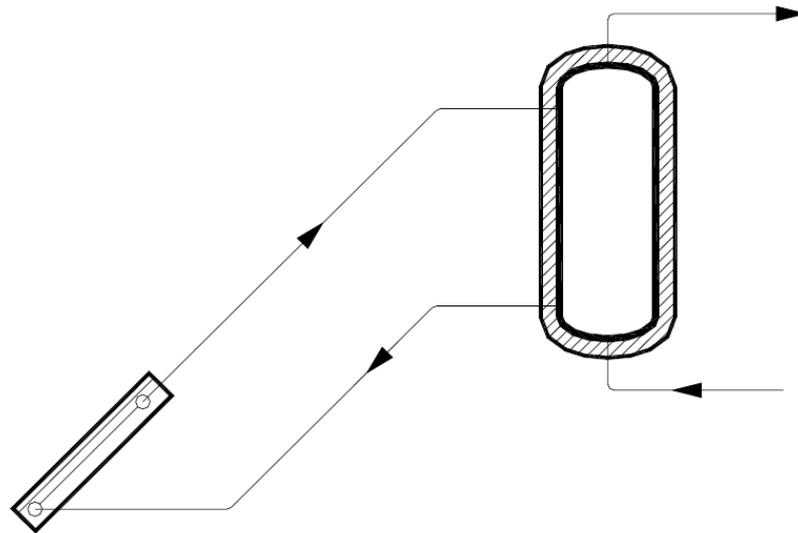


Fig. 1: Instalación de tipo termosifón directo. (Fuente: Sodean, S.A)

La *circulación forzada* por el contrario, funciona a través de la actuación de bombas, que aportan al fluido la energía necesaria para su correcta circulación. Pese a necesitar un aporte energético para el funcionamiento de las mismas, en algunos casos puede revertir un beneficio al funcionamiento de la instalación.

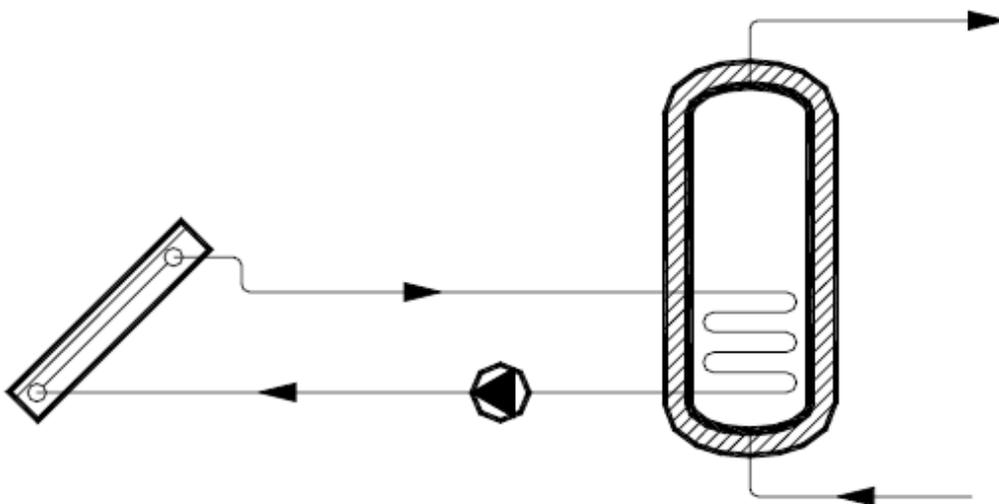


Fig. 2: Instalación de flujo indirecto de tipo forzado. (Fuente: Sodean, S.A)

La transferencia de calor de forma *directa* hace que el fluido que circula por el captador sea empleado para su uso final. Es decir, el fluido entra desde la red de suministro y es pasado por la zona donde se encuentra el captador solar. El fluido es calentado debido a su paso por esta zona y una vez haya salido de los captadores es conducido hacia su consumo directo.

La transferencia de calor de forma *indirecta* permite que el fluido que pasa por los captadores no sea destinado al consumo sino que se trate de un fluido empleado para el intercambio de calor. En resumen, se trata de "un fluido que calienta otro fluido". A este fluido lo denominaremos "*fluido de trabajo*". Se distingue, cuando la transferencia de calor es indirecta, entre un circuito primario (que contiene el fluido de trabajo) y un circuito de consumo (que toma agua de la red y es calentada al tomar el calor del fluido de trabajo en el intercambiador interno en el acumulador).

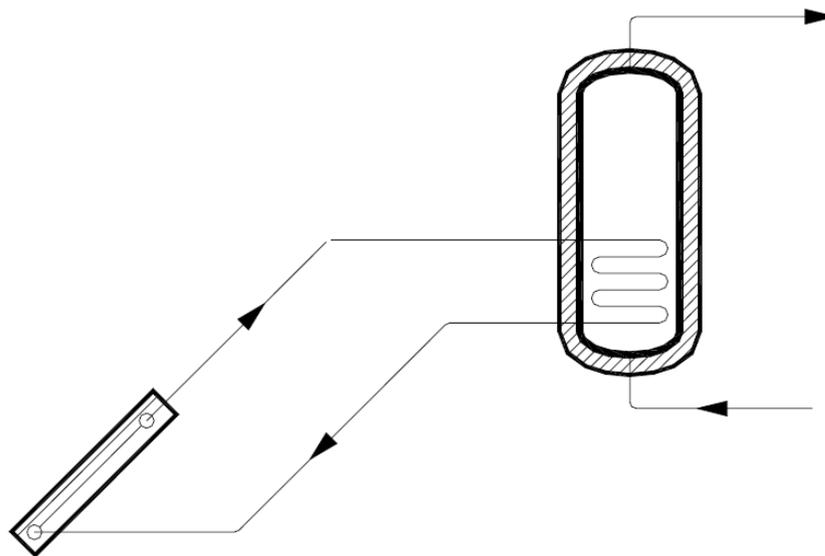


Fig. 3: Instalación de flujo indirecto de tipo termosifón. (Fuente: Sodean, S.A)

Los sistemas de captación de energía solar que serán objeto de estudio en este proyecto serán principalmente de *circulación forzada* y la transferencia de calor se realizará de *forma indirecta*.

1.2.3.- Fluidos de trabajo.-

Por lo general, el fluido de trabajo más usado en estos casos es el agua. En los sistemas de transferencia directa, el agua que va a ser finalmente consumida, es calentada en las tuberías de los colectores. Por otra parte, si el sistema de transferencia de calor es indirecto, por lo general, el fluido empleado será también agua, pero se encontrará con un componente disuelto que aumentará su temperatura de ebullición y disminuirá su temperatura de congelación. Por lo general, el componente utilizado para mejorar las propiedades de congelación / ebullición del agua es el propilenglicol.

Se deberá considerar que a bajas temperaturas la viscosidad de la mezcla aumentará por lo que el impulso deberá ser mayor para estos casos. Otra consideración similar se deberá tener en el momento de someter la mezcla a temperaturas altas, ya que se puede evaporar uno de los compuestos y empeorar las propiedades de funcionamiento de nuestro sistema.

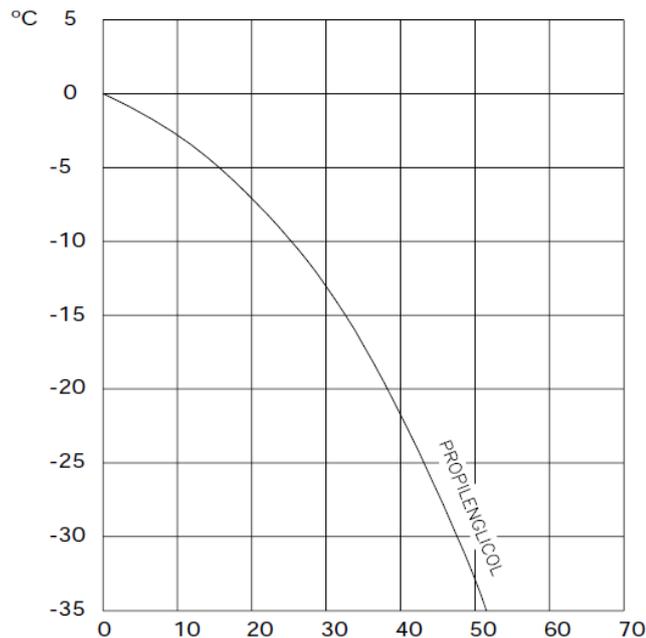


Fig. 4: Porcentaje de propilenglicol en peso. (Fuente: Sodean, S.A.)

1.2.4.- Principio de funcionamiento.-

Una vez conocidos los tipos de instalaciones será más liviano entender el funcionamiento de las mismas atendiendo como objetivo la obtención de agua caliente sanitaria.

La energía solar tomada, calentará unas tuberías por las que circulará un fluido. Éste fluido será enviado a un dispositivo de almacenamiento denominado acumulador.

En el acumulador, el agua caliente sanitaria queda recogida hasta que es demandada para su posterior consumo.



Fig. 5: Depósitos acumuladores. (Fuente: Registro CDT)

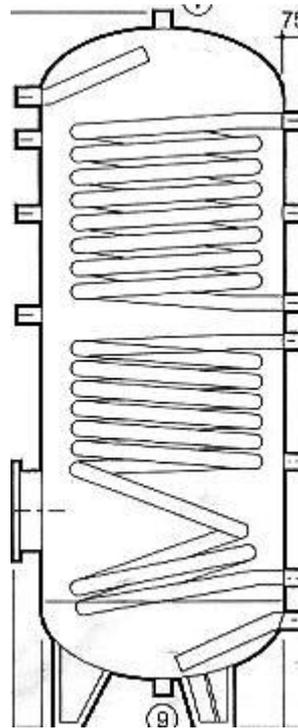


Fig. 6: Vista interior de un depósito acumulador (Fuente: Registro CDT)

En la mayoría de los casos, además del acumulador, se hará preciso un sistema denominado *sistema de apoyo*. El citado sistema consta de un calentador inmediato de agua caliente sanitaria, por las vías conocidas a saber, butano, propano, gas natural, electricidad entre otros. Quizás pueda, a priori, parecer redundante el uso de una instalación solar si igualmente se debe hacer uso de un sistema de calentadores de ACS instantáneos. No obstante, se obtiene un ahorro importante de energía haciendo uso de instalaciones solares para el calentamiento de agua, siendo el aporte energético del sistema de apoyo en la mayoría de las ocasiones prácticamente mínimo.

En base a la forma elegida para la transferencia del calor se debe resaltar, que de ser el sistema de flujo indirecto, el agua tomada de la red entrará directamente al acumulador donde, a través de un intercambiador situado en el interior del mismo se procederá al calentado del agua tomada para su posterior consumo.

Para algunas instalaciones, se puede hacer preciso, además de los instrumentos citados, un vaso de expansión, debido a que en el interior del sistema se alcanzan presiones considerables que pueden ser absorbidas por el citado elemento, evitando así problemas irreversibles en la instalación.

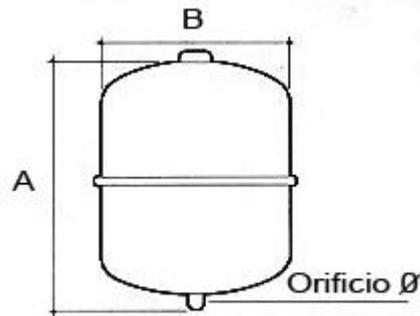


Fig. 7: Imagen de un vaso de expansión. (Fuente: Registro CDT)

Finalmente las instalaciones que presentan un régimen de funcionamiento basado en flujo forzado requerirán de la instalación de un sistema de bombeo, el cual, deberá ser correctamente dimensionado a fin de vencer las pérdidas de carga acumuladas a lo largo del sistema y conseguir aportar energía suficiente al fluido para vencer diferencias de temperatura y pérdidas de carga ya mencionadas.

Las instalaciones fototérmicas citadas pueden ser aplicables tanto a industria como a viviendas unifamiliares y plurifamiliares. Simplemente bastará con realizar una correcta disposición y dimensionamiento de los equipos en base a la demanda solicitada.

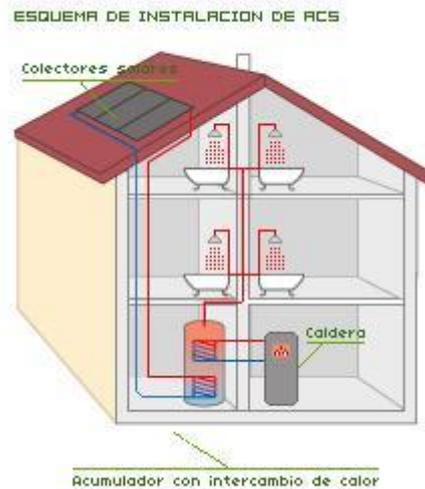


Fig. 8: Esquema de instalación de ACS aplicada a viviendas (Fuente: Solclima)

1.3.- Principales aplicaciones de la energía solar térmica.-

A lo largo del texto se ha podido observar que una de las principales aplicaciones de la energía solar térmica se cifra en la obtención de agua caliente sanitaria (ACS). No obstante, no es la única aplicación que esta fuente de energía nos presenta sino que se pueden barajar otras aplicaciones basadas en principios análogos pero destinados a aplicaciones distintas.

Asimismo, se puede contemplar la aplicación de la energía solar térmica para el calentado de suelos, con aplicación en la construcción. Este sistema de calefacción del suelo es denominado sistema de "piso radiante". El sistema de calefacción por piso radiante calienta el suelo realizando la convección desde el mismo y obteniéndose así un mayor aprovechamiento del calor, no existiendo la necesidad de calentar las zonas más altas de la habitación para poder disfrutar de una sensación térmica más apacible. El sistema funcionará a través de una red de conductos que transportarán ACS a una temperatura aproximada de 37°C y la distribuirán por la red, obteniendo así un calentado de los compartimentos con una mayor calidad y una menor demanda energética.

A continuación se presenta un diagrama de funcionamiento de la obtención del ACS a distribuir por el método de piso radiante:

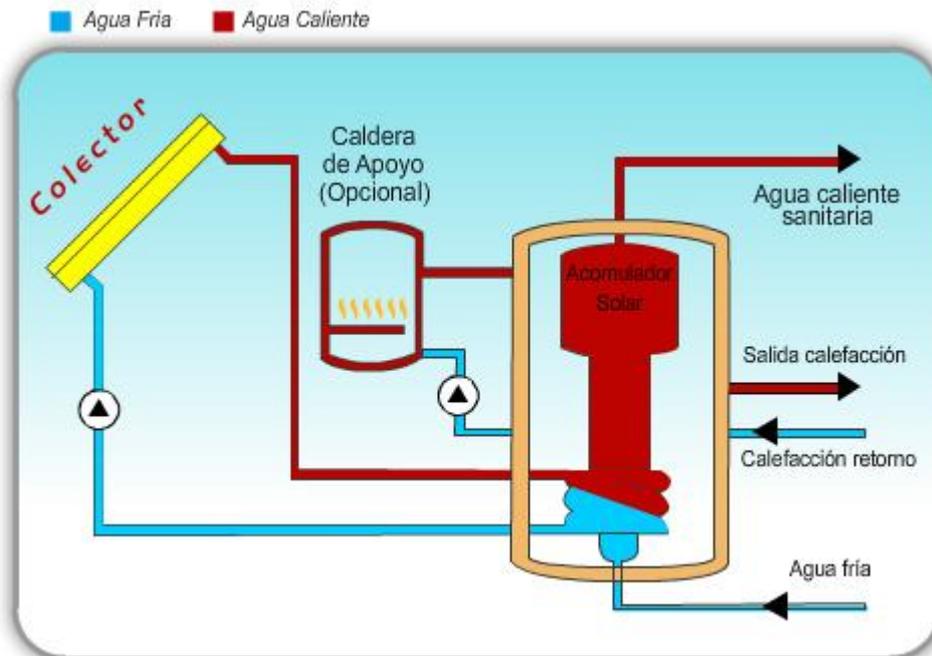


Fig. 9: Circuito del ACS para obtención de calefacción y agua para consumo. (Fuente: Registro CDT)

Entre las ventajas que presenta la calefacción por piso radiante destacan:

- La distribución de temperatura que se consigue en la habitación, manteniendo un mayor temperado a nivel de suelo y descendiendo ésta con la altura. De esta forma no se desaprovecha energía calentando innecesariamente la parte alta de la habitación a calefactar.
- Cuando se trabaja con energía solar para obtener calefacción, el piso radiante es el más óptimo.

Otra de las aplicaciones que comienza a extenderse para la energía solar térmica es el temperado de piscinas a través de un sistema análogo al comentado para el suelo radiante. El motivo de su extensión reciente, además de por su alto rendimiento y por su alternativa como energía renovable, es la imposición del Código Técnico de la Edificación, en cuyas disposiciones recoge la necesidad del temperado de piscinas climatizadas entre otros métodos con éste.

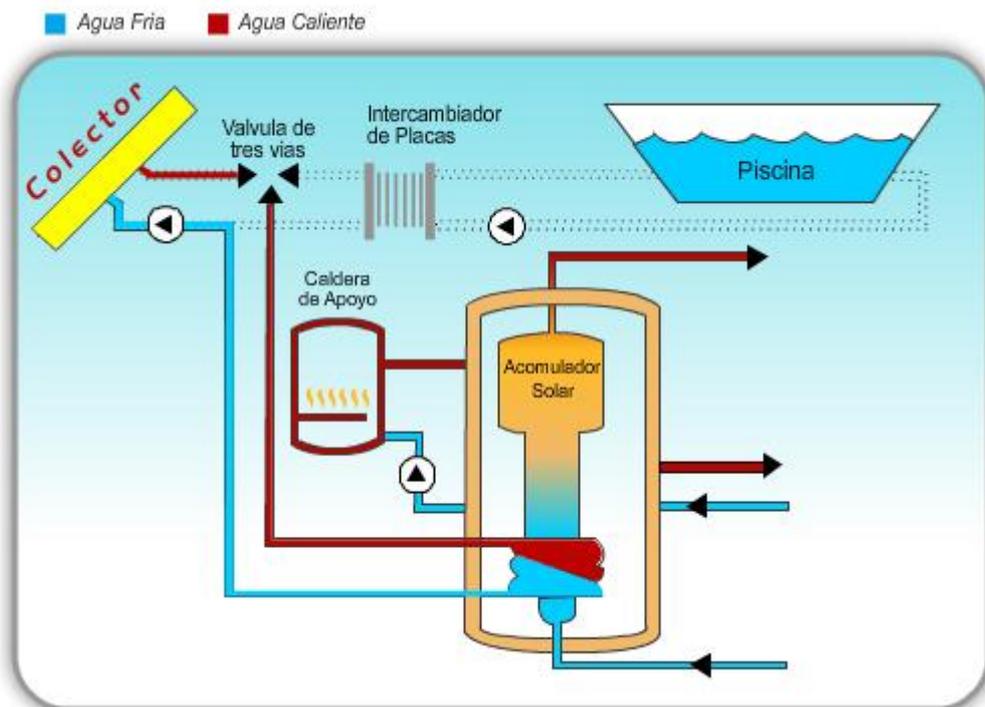


Fig. 10: Circuito del ACS incorporando la climatización de una piscina. (Fuente: Registro CDT)

El temperado de piscinas por medio de este sistema tiene las siguientes ventajas:

- Puede obtenerse por medio de un colector solar de bajo precio (sin cubierta de vidrio y sin aislamiento).
- La piscina por si misma sirve como depósito de almacenamiento de energía.
- La bomba a utilizar para hacer pasar el flujo por el colector, puede ser la misma que es utilizada para filtrar.

Además de las aplicaciones citadas, se han encontrado recientemente aplicaciones de la energía solar térmica para calentado con ACS en la industria. Algunas de las industrias con mejores aplicaciones son las siguientes:

- Calor para procesos industriales.
- Producción de cerveza y malta (T^a necesaria 60°C).
- Industria conservera (para el escaldado de los productos).
- Industria cárnica (cocción productos).
- Industria láctea (pasteurización y estabilización).
- Industria textil (operaciones de secado, teñido, etc.)

Finalmente, se deberá destacar una aplicación innovadora, cuyo fin versa en la obtención de refrigeración de espacios. Este hecho se obtiene a través de una operación con un ciclo de absorción, el cual, separa vapor de agua de sal marina adicionada anteriormente, refrigerándose en el proceso el agua calentada por energía solar y propiciando condiciones de refrigeración donde es aplicado este sistema.

Este hecho se encuentra aún en estudio, a fin de radicar posibles problemas con brotes de legionelosis. No obstante se abre así una nueva vía para una fuente de energía inagotable y ecológica.

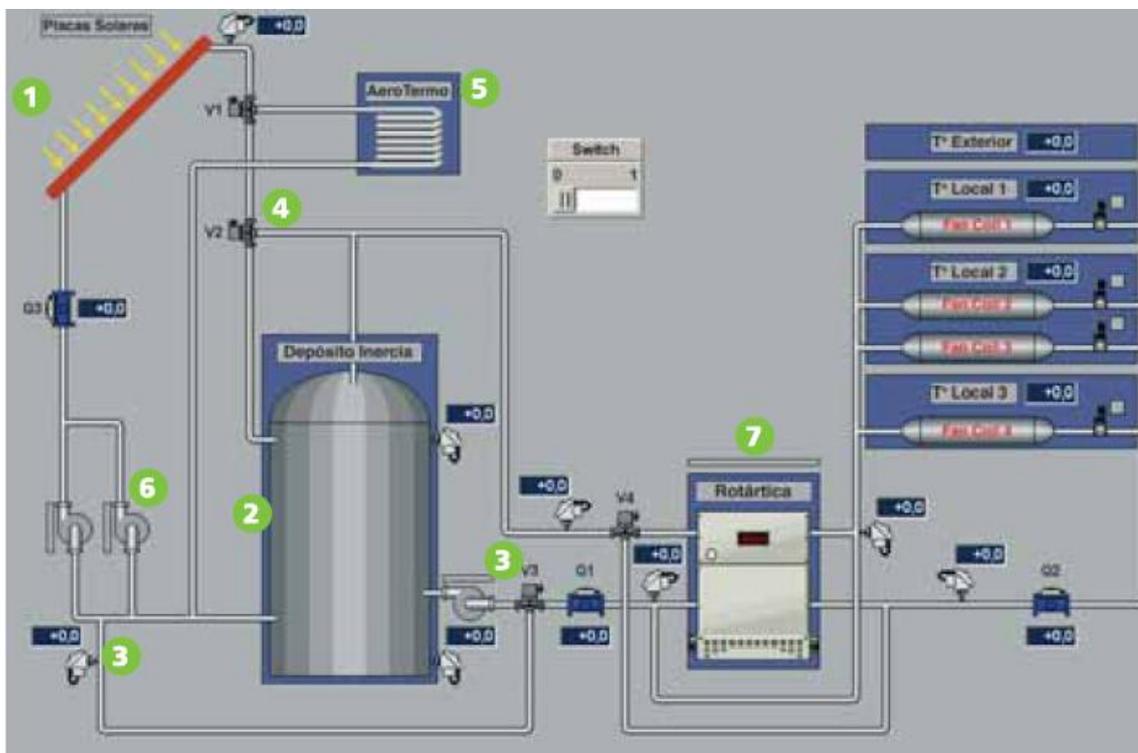


Fig. 11: Esquema de proceso para obtención de frío a través de radiación solar (Fuente: ARGEM)



Fig. 12: Máquina de absorción. Casa comercial "Rotartica". (Fuente: ARGEM)

1.4.- Información tomada sobre colectores solares destinados a la generación de ACS.-

El eje central de una instalación solar, sea cual fuere su naturaleza o su aplicación, radicarán siempre en los captadores. De ellos depende la práctica totalidad del funcionamiento, rendimiento y buen proceder de la instalación. Cualquier error, por leve que sea y se encuentre ubicado en los captadores o el circuito de captación puede inutilizar la instalación o hacer que su rendimiento caiga considerablemente.

Por todo ello, se considera necesario explicar de forma detallada la forma de trabajar, operar y proteger a los mismos ante las diversas situaciones a las cuales se puede afrontar.

1.4.1.- Disposiciones más destacables del CTE para los captadores.-

En base a las disposiciones dadas por el CTE, podemos encontrar una serie de exigencias para el buen funcionamiento de los captadores y el sistema de captación, a continuación.

En primer lugar, el captador deberá estar homologado por la entidad competente a tenor del R.D. 891/1980 sobre homologación de los captadores. Además, se aconseja que, de existir varios captadores en una instalación, éstos sean del mismo modelo. Asimismo, se pide que los captadores tengan un coeficiente global de pérdidas en función de la

temperatura ambiente y en función de la temperatura de entrada, menor de $10 \text{ Wm}^2/\text{°C}$.

Por otra parte, se considera que el captador debe llevar un orificio por la parte inferior, que tendrá como fin drenar el agua que quede dentro de los mismos para evitar daños a la instalación además de una placa en la que consten datos como el modelo del mismo, número de serie, área del captador, presión máxima de servicio y empresa instaladora entre otros.

También se prohíbe la variación de las propiedades ópticas del captador y que el material de la carcasa de los mismos evite tensiones inadmisibles.

Finalmente, se establece unos tiempos máximos para la realización de operaciones de mantenimiento de los captadores, las cuales reflejamos en las tablas inferiores.

Elemento de la instalación	Operación (meses)	Frecuencia	Descripción
CAPTADORES	Limpieza de cristales	A determinar	Con agua y productos adecuados
	Cristales	3	IV condensaciones en las horas centrales del día.
	Juntas	3	IV Agrietamientos y deformaciones.
	Absorbedor	3	IV Corrosión, deformación, fugas, etc.
	Conexiones	3	IV fugas.

Tabla 2: Operaciones a realizar sobre los captadores con la frecuencia determinada (IV indica inspección visual)

Equipo	Frecuencia (meses)	Descripción
Captadores	6	IV sobre original.
		IV diferencias entre captadores.
Cristales	6	IV condensaciones y suciedad
Juntas	6	IV agrietamientos, deformaciones
Absorbedor	6	IV corrosión, deformaciones
Carcasa	6	IV deformación, oscilaciones, ventanas de respiración
Conexiones	6	IV aparición de fugas
Estructura	6	IV degradación, indicios de corrosión, y apriete de tornillos
Captadores*	12	Tapado parcial del campo de captadores
Captadores*	12	Destapado parcial del campo de captadores
Captadores*	12	Vaciado parcial del campo de captadores
Captadores*	12	Llenado parcial del campo de captadores

Los campos marcados con * se realizarán si se opta por el tapado o vaciado parcial del campo de captadores.

Tabla 3: Operaciones de mantenimiento de los captadores solares y sus periodos máximos de revisión (IV indica inspección visual).

1.4.2.- Regímenes de situación de los captadores en las instalaciones.-

Con objeto de disponer un sistema de captación solar acorde a los requisitos de la instalación se puede conexas varios captadores.

De esta forma, se nos presentan tres formas de conectar los mismos a saber, conexión en serie, conexión en paralelo y conexión mixta.

En la **conexión en paralelo**, el caudal de fluido que circula a través de cada captador es el mismo, siendo el caudal total de la instalación la suma de todos los caudales obtenidos de cada captador. De esta forma, se obtienen caudales elevados, con saltos de temperatura moderados y con una pérdida de carga correspondiente a la de un único captador.

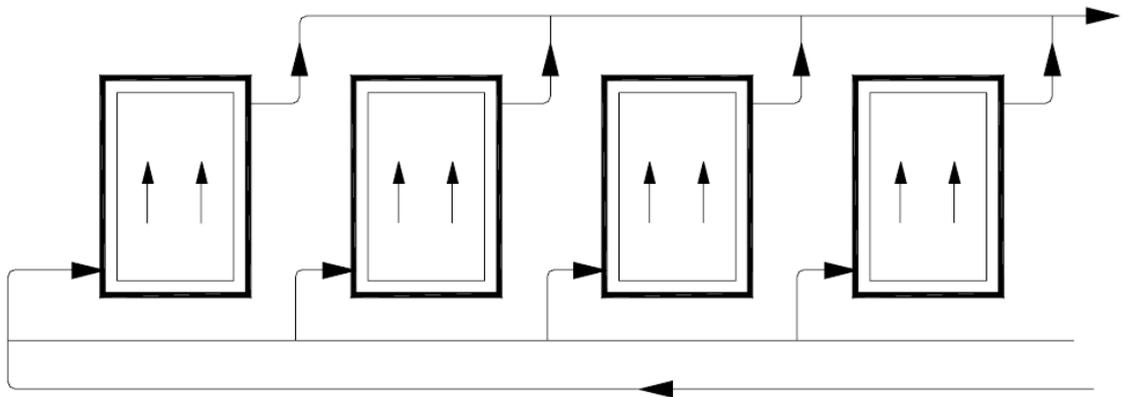


Fig. 13: Conexión de captadores en paralelo mediante conductos externos. (Fuente: Sodean)

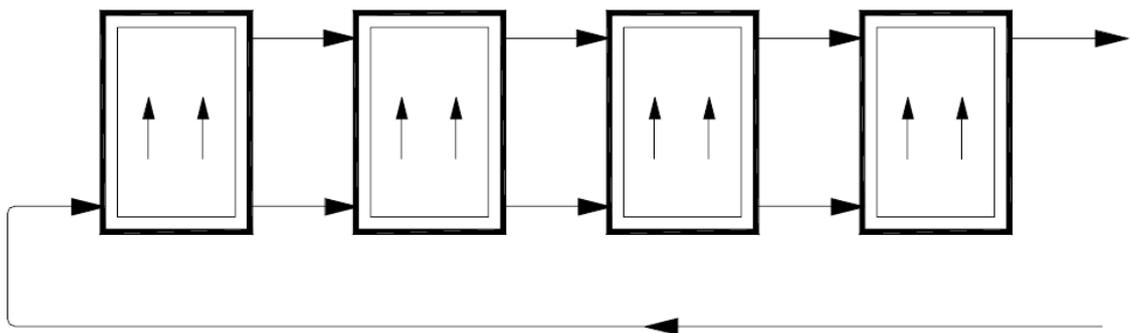


Fig. 14: Conexión de captadores en paralelo mediante conductos internos. (Fuente: Sodean)

En la **conexión en serie** se trata de un único caudal circulante por la instalación que pasa por todos los captadores, por lo que el caudal total coincidirá con el caudal circulante. Se suelen usar caudales relativamente bajos obteniendo saltos de temperatura relativamente grandes. El fluido se

va calentando a medida que pasa a través de los captadores por lo que, de acuerdo a la curva de rendimiento de un captador solar, va disminuyendo el rendimiento de los mismos. La pérdida de carga de los captadores es superior al conexionado en paralelo ya que corresponde con la suma de las pérdidas de carga de cada uno de los captadores conectados.

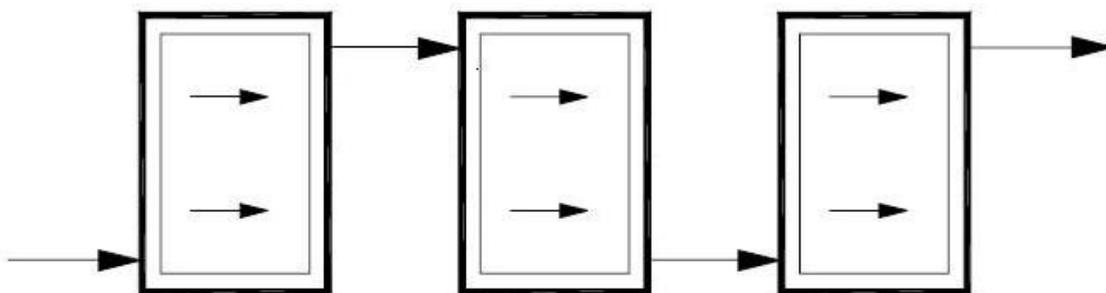


Fig. 15: Conexión de captadores en serie. (Fuente: Sodean)

En grandes instalaciones es habitual emplear los dos tipos de conexionado explicados, denominando a este hecho **conexión mixta**. Las baterías de captadores normalmente se encuentran constituidas por captadores conectados en paralelo entre sí. Estas baterías se suelen conectar entre sí en serie o en paralelo.

El conexionado entre captadores deberá asegurar un igual recorrido hidráulico en todos los captadores.

El número máximo de captadores conectados en paralelo será especificado por las limitaciones de los mismos, las cuales serán especificadas por el fabricante. El número máximo de captadores conectados en serie será de cuatro.

1.4.3.- Concepto de absorbedor, disposiciones de los absorbedores.-

Un absorbedor consiste en una única lámina o varias aletas metálicas con adecuada conductividad térmica y varias tuberías metálicas por las que circula el fluido de trabajo. Estas tuberías han de presentar un buen contacto con la lámina metálica con objeto de optimizar la transferencia de calor. Las láminas o aletas suelen presentar un revestimiento exterior que tiene como objetivo aumentar la absorción y disminuir la emisividad del absorbedor.

Por lo general, el absorbedor metálico suele ser de cobre. Uno de los objetivos del absorbedor es que la transferencia de calor entre el absorbedor y las tuberías sea adecuada. Se distinguen dos configuraciones para las tuberías de los absorbedores a saber, parrilla de tubos y serpentín. Además se destaca un último tipo denominado integral. A continuación se detallan los tres tipos.

Por una parte, el absorbedor **tipo parrilla** está formado por varias tuberías paralelas que se unen a los conductos de distribución. Este tipo de configuración presenta una pérdida de carga relativamente pequeña y es normalmente empleada en instalaciones por termosifón donde la pérdida de carga debe ser la mínima. Dentro de éste tipo debemos destacar los subtipos longitudinal y transversal en base a la disposición de las tuberías paralelas respecto de la del captador.



Fig. 16: Colector tipo parrilla (Fuente: Registro CDT)

Por otra parte, tenemos la disposición **tipo integral**. Éste tipo de disposición considera tres conductos de disposición transversal y dos conjuntos de tuberías longitudinales. Este tipo es el que mejor se adapta a la integración de los colectores en edificios aunque presenta una mayor pérdida de carga.

Finalmente, tenemos la disposición de **tipo serpentín**. En éste último tipo, se considera un único conducto que circula de forma longitudinal repetidas veces el captador. Presenta como ventaja la eliminación del problema del equilibrio hidráulico aunque también presenta una mayor pérdida de carga.

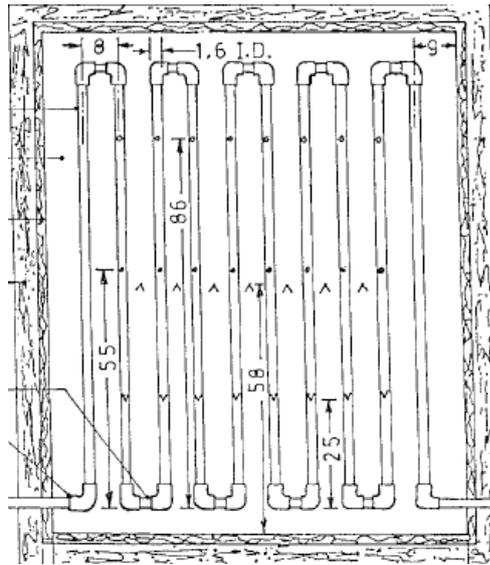


Fig. 17: Colector tipo serpentin (Fuente: Artículo Kumar-Prasad).

Se presentaba en las líneas anteriores el concepto de equilibrio hidráulico. Este hecho consiste en el equilibrado de los caudales circulantes en los conductos de las disposiciones parrilla e integral, con objeto de que la contribución energética por área de intercambio sea similar y, en su conjunto presente buenos rendimientos a la instalación.

1.4.4.- Condiciones a tener en cuenta en el diseño de los captadores solares térmicos.-

El **área** de captadores se podrá calcular fácilmente en base a la siguiente expresión:

$$60 < M/A < 100 \quad (1.1)$$

Donde M es la carga de consumo, medida en litros/día y A es el área total de los captadores para ese consumo, medida en m².

La **orientación** de los captadores se realizará en dirección sur con un margen de desviación de 45° respecto de ésta situación. La inclinación de los captadores variará según el uso que se le brinde a la instalación aunque siempre oscilará entre los 30° (periodos estivales) y 45° (periodos invernales).

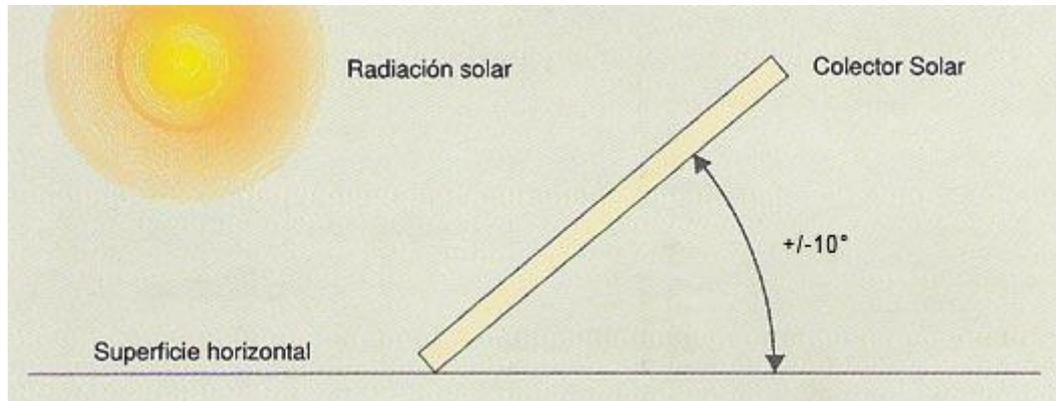


Fig. 18: Ilustración de la orientación de los colectores (Fuente: Registro CDT).

El **materi**al que constituye el captador estará constituido por vidrio normal o templado de espesor superior a 3 mm y con una transmisividad superior a 0,8. La distancia entre el absorbedor y la cubierta transparente deberá estar entre 2 y 4 cm. El absorbedor deberá estar constituido por materiales metálicos evitando usar acero galvanizado.

La **pérdida de carga** que presenten los acumuladores referenciada para un caudal de 1 l/min m² deberá ser inferior a 1 m.c.a.

Finalmente, la **estructura** soporte deberá dimensionarse para resistir sobrecargas de viento y nieve. Además, permitirá las necesarias dilataciones y se evitará que los topes de sujeción de los captadores o la propia estructura en sí no arrojen sombra sobre los captadores.

1.4.5.- Fluidos de trabajo empleados en las instalaciones.-

Las instalaciones solares térmicas de funcionamiento indirecto precisan de un fluido que circule en sus conductos, que ejercerá de transmisor del calor tomado en el absorbedor. Este calor tomado lo transmitirá en el acumulador al agua tomada de la red que circulará por el denominado circuito de consumo.

Generalmente, se suele emplear agua con bajos niveles de mineralización y de baja dureza (concentración de iones Ca²⁺), a fin de evitar depósitos de cal y otras deposiciones en las paredes del conducto que impidan la

transmisión del calor de forma correcta. El agua como tal, es un buen fluido transmisor del calor que es empleado en la mayoría de las instalaciones solares térmicas. Pero el agua como tal, presenta inconvenientes a la hora de emplearla como fluido de trabajo: y estos son los valores de fusión y ebullición, los cuales pueden suponer problemas para los conductos de las instalaciones.

Para solventar el problema propuesto se hace uso de fluidos que aumenten la temperatura de ebullición del agua y disminuyan la temperatura de fusión. Se emplearán entre otros los que mencionamos a continuación.

Un compuesto a considerar, es el etilenglicol. Este compuesto presenta unas propiedades térmicas que lo han hecho un buen fluido de trabajo. Recientemente, ha sido desplazado por el propilenglicol, ya que, pese a tener una menor conductividad térmica, presenta menores valores de toxicidad. La concentración empleada de estos compuestos ronda entre el 30 y el 50% de proporción de los mismos en agua.

Otro de los compuestos que se han barajado ha sido las disoluciones de siliconas en agua. Este compuesto, de naturaleza inorgánica se ha probado que no es degradante, ni tóxico, además de no ser corrosivo. La imposición de este compuesto en los conductos de captación fue descartada, ya que las viscosidades que presenta son bastante altas y además presenta unos valores de conductividad térmica bastante bajos en comparación con el propilenglicol. El alto precio de las siliconas para su empleo fue otro factor determinante para descartarlas por completo de esta función.

Recientemente, en algunos lugares se ha prohibido el uso de etilenglicol por su alta toxicidad y se ha impuesto el propilenglicol.

En los fluidos de trabajo que se emplean, además, se deberán añadir unos compuestos denominados *inhibidores de corrosión*. Estos compuestos se añadirán con objeto de evitar el efecto de la corrosión producido por el agua empleada en la mezcla y por la posterior degradación del propilenglicol que puede, en algún momento generar problemas a la instalación. Se puede hacer uso de inhibidores de corrosión inorgánicos, que generalmente son sales de molibdeno, aunque presentan como problema su toxicidad y la afección a las propiedades caloportadoras del fluido.

Los inhibidores de corrosión más utilizados son, hoy por hoy sales orgánicas, formadas por ácidos carboxílicos, los cuales, retrasan notablemente la corrosión sin afectar a la transmisión de calor que genera el fluido.

1.4.6.- Principales problemas que alteran el funcionamiento de los captadores solares.-

El funcionamiento ideal de los captadores solares planos se ve generalmente afectado por una serie de factores externos a los que tanto diseñadores como técnicos de mantenimiento de la instalación deberán solventar con cierta facilidad.

Entre los problemas más destacados, y que con más frecuencia suceden en la CARM podemos destacar como principal el sobrecalentamiento, aunque no será el único problema que consideraremos, ya que las heladas, las sombras y malas condiciones de dimensionado son también determinantes en el buen funcionamiento de una instalación solar térmica y bastante frecuentes en la CARM, según apuntan fuentes de ARGEM.

De esta forma, consideraremos como *problemas principales* los citados a saber, sobrecalentamientos, sombras, heladas y mal dimensionado, aunque en una instalación se pueden presentar problemas de diversa naturaleza que pueden afectar si cabe, de forma más severa al funcionamiento de la instalación. No obstante, por ser estos mentados los más comunes, serán en los que se hará una explicación más detallada.

En primer lugar, el problema más común en la CARM radica en el **exceso de radiación solar**, preferentemente en periodos estivales, donde se alcanzan temperaturas ambiente que pueden llegar a alcanzar valores pico superiores a los 40° en algunos puntos de la geografía regional. Estas altas temperaturas no pasan desapercibidas en el funcionamiento de las instalaciones solares térmicas, en las que se sobrecalientan los colectores y pueden provocar alteraciones en su funcionamiento.

Ante tal situación, los técnicos de mantenimiento y los diseñadores optan por soluciones tales como el tapado parcial de colectores y el vaciado parcial del campo de colectores. Según fuentes de la Agencia de Gestión energética de la Región de Murcia, ARGEM, la opción del tapado parcial de colectores no es del todo deseable, ya que no se aprovecha toda la energía que el citado dispositivo puede aportar, además de poder suponer en algunos momentos del funcionamiento un riesgo para la instalación. Si se opta por el vaciado

parcial del campo de colectores, se deberá hacer tal como rigen las disposiciones del CTE comentadas en apartados anteriores para su correcto mantenimiento, acorde con la legislación vigente.

Otro de los problemas a los que se deben afrontar los colectores solares planos es a las **heladas**, que, pese a ser menos intensas en la CARM, en comarcas como la del Noroeste o en el Altiplano pueden ser considerables las bajas temperaturas que allí se registran.

La deposición de escharcha o nieve deberá ser atendida con especial cuidado, ya que una deposición considerable puede conllevar corrosiones en la estructura o daños severos en los cristales del captador.

Para solventar problemas internos de la instalación, consecuencia de temperaturas extremas, se deberá prestar especial atención al fluido de trabajo empleado en el circuito primario o de captación. Este fluido, generalmente, suele ser agua con una sustancia química disuelta.

La sustancia química empleada de uso más común suele ser el propilenglicol, ya que aumenta la temperatura de ebullición de la mezcla y disminuye la temperatura de congelación, además de no ser nocivo para los conductos y elementos de la instalación.

El problema del **mal dimensionado** es un problema que recientemente ha sido descubierto por los técnicos de instituciones oficiales, que, inspeccionando las instalaciones realizadas hasta la fecha, encuentran gran número de instalaciones con exceso o defecto de áreas de colectores o un mal cálculo de consumo promedio entre otros factores. La solución estribará en una mejor formación de los técnicos que diseñan y operan las instalaciones de esta naturaleza.

Finalmente, pese a ser un problema mejor tipificado y con mejores soluciones y más viables, las **sombras** es otro de los factores importantes que reducen el rendimiento de los colectores, ya que muchos de ellos están ubicados en áreas urbanas donde el porcentaje de sombras es bastante elevado y puede revertirnos en una mala rentabilidad de la inversión realizada si no se está bien contemplado este asunto.

1.5.- Información obtenida sobre la situación actual de la energía solar térmica en España y en la CARM (Fuente: ARGEM)

Con objeto de conocer la coyuntura actual referida al asunto de la energía solar y más en concreto de la energía solar térmica, se procedió a recabar información a por fuentes y datos oficiales a través de la agencia la gestión de energía en la Región de Murcia (ahora Argem). Las valoraciones más determinantes fueron las que bajo éstas líneas figuran.

1.5.1.- Estado actual de la energía solar en la CARM y en España.-

Según datos obtenidos por Argem en un informe realizado a finales del año 2006, se encontraban instalados 23.000 m² de instalaciones solares térmicas en la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (ahora CARM). Se prevé que en los próximos años el crecimiento de las áreas de explotación de energía solar se vea en incremento, aunque no se ha podido facilitar expectativas de crecimiento de una forma más concreta.

De la imagen inferior se puede observar que la tendencia es creciente pero que en los últimos años se obtiene una mayor expectativa frente a lo obtenido realmente, en cuanto a energía solar térmica se refiere.

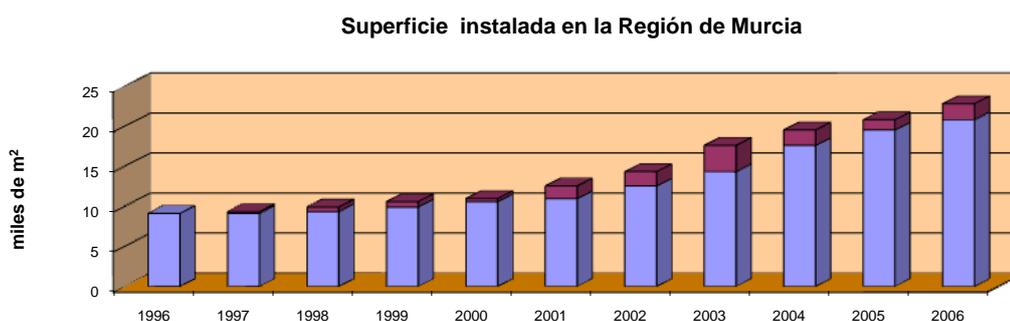


Fig. 19: Áreas de explotación de energía solar térmica realizadas (azul) y esperadas (rojo) en la CARM. Fuente: Argem

La entrada en vigor del nuevo "Código técnico de la edificación", del 29/09/06, hizo pensar hasta a los más pesimistas en un crecimiento en la oferta y la demanda de ésta fuente de energía. Estas ilusiones debían

permanecer en estado de espera, ya que para poder aplicar la nueva normativa que rige el nuevo CTE debieron inicialmente de llevarse a término los proyectos firmados en tiempo previo a la puesta en vigor del mismo. Una vez que fueron surgiendo nuevos proyectos de construcción a partir de la fecha de aprobación del CTE se procedió a aplicar la normativa impuesta en las disposiciones del mismo, pudiendo así observar los resultados que de la aplicación de éste emanaban.

En vista de las buenas expectativas que generó el nuevo CTE acerca de sus secciones referentes a contribuciones mínimas de energías solares fotovoltaica y térmica, se realizaron unas previsiones de las que se extrapolaron datos esperados hasta el año 2010. La debacle del sector de la construcción, acompañado de la coyuntura económica actual, ha hecho que la demanda de éste tipo de energía haya caído considerablemente, prácticamente de forma proporcional a la caída del número de inmuebles construidos.

La situación económica se ha hecho también presente en la caída de la demanda de energía solar térmica, haciendo que las empresas fabricantes e instaladoras recibieran una menor demanda en el último semestre de 2007 y durante todo el año 2008 que fue cayendo progresivamente conforme empeoraba la situación económica.

Ésta debacle en el sector es debida a las inversiones que en éste tipo de energías han dejado de realizar como medida preventiva ante la situación descrita.

En la imagen inferior se observa las expectativas que presentaba la puesta en marcha del CTE en el año 2010 y los datos obtenidos hasta la fecha, que no revisten de ningún optimismo destacable y hace vaticinar que a tenor de los datos obtenidos, las previsiones descritas pueden no ser alcanzadas.

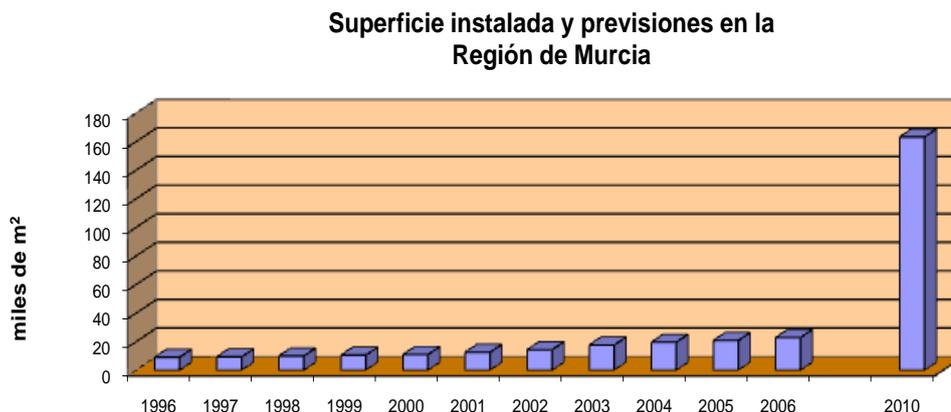


Fig. 20: Resultados esperados para 2010 y datos obtenidos hasta 2006 sobre áreas de explotación totales de energía solar térmica en la CARM. Fuente: Argem

En resumen, la caída del sector de la construcción y la falta de inversión se convierten, a fecha de hoy en dos serios problemas para la expansión de la energía solar tanto térmica como fotovoltaica. No obstante, desde el gobierno de la CARM y en su nombre la conserjería de medio ambiente, se han puesto a disposición de empresas y particulares, subvenciones para fomentar la expansión del sector, de las cuales no han sido solicitadas gran parte de las mismas quedando sin cubrir la citada partida presupuestaria consiguiente, y las expectativas de fomento de las energías renovables por parte de la CARM y del gobierno central.

La situación de la energía solar en la CARM se puede hacer extensiva al resto del territorio nacional, barajando datos similares en el resto de comunidades autónomas, de donde previsiblemente tampoco se alcancen los objetivos marcados tras la puesta en vigor del nuevo CTE, según representantes de Argem.

1.5.2.- Principales problemas a los que se enfrenta la energía solar térmica en la Región de Murcia.

La energía solar térmica tanto en la CARM como en el resto del país se enfrenta a una serie de factores que frenan su crecimiento y expansión en el mercado.

El primer factor al que se enfrenta es a la escasa y precaria formación del personal que ejerce las labores de diseño, ejecución y mantenimiento de las citadas instalaciones. Esta afirmación no es infundada, ya que fue una de las conclusiones con las que finalizó un estudio de Argem en el año 2007, en el cual se realizaron inspecciones a las instalaciones solares térmicas instaladas en la CARM durante los años 2003 y 2004.

El mismo estudio recoge que de las instalaciones inspeccionadas, se pudo comprobar que el aporte de ACS por parte de la instalación solar era bastante inferior al previsto, realizándose el consumo mayoritario de ACS en un porcentaje excesivamente elevado a través del sistema de apoyo (calentadores de butano, calderas eléctricas, a gasóleo, etc.).

En condiciones normales y con un correcto dimensionado de la instalación en base al uso para el cual se va a fabricar (ya sea doméstico, industrial o público), la instalación debería aportar un valor en torno al 70 % de ACS demandada, siendo el 30 % restante de la demanda de ACS correspondiente a los sistemas de apoyo de las instalaciones.

Se concluye de éste estudio que una escasa formación del personal técnico encargado de la instalación y gestión de estas instalaciones, junto a unos bajos rendimientos de los mismos, generan un gran impedimento para la expansión de la energía solar térmica como fuente de ACS.

Otro de los problemas con los que se puede encontrar tanto usuarios como instaladores de éste tipo de instalaciones en la CARM es el sobrecalentamiento de los colectores, preferentemente en épocas estivales, que ocasionan la evaporación del fluido de intercambio del circuito primario, o simplemente evaporación del fluido de consumo en pequeñas instalaciones domésticas unifamiliares.

Este problema supone grandes quebraderos de cabeza para los técnicos, que deben dar soluciones viables tanto técnica como económicamente para potenciar esta fuente de energía y calor, evitando en la medida de lo posible el cubrir los colectores, hecho que en instalaciones de grandes dimensiones se hace una solución totalmente improcedente. Los problemas que suponen los sobrecalentamientos y los bajos rendimientos que de las instalaciones solares térmicas se obtienen han hecho que las empresas instaladoras se focalicen mayoritariamente en la explotación de la energía solar fotovoltaica frente a la energía solar térmica que en los últimos años ha quedado un tanto desplazada.

Como último factor que ejerce un efecto negativo sobre la expansión de la energía solar térmica en la CARM y en el resto del territorio nacional ha sido la ausencia de legislación y reales decretos sobre su uso y explotación, de forma antagónica a la energía solar fotovoltaica que ha gozado de plenos privilegios legislativos y se ha visto amparada por gobernantes, empresarios e inversores.

La mayor publicación legislativa de la que se ha visto ampliamente beneficiada la energía solar fotovoltaica ha sido del R.D. 661/2007, el cual, entre sus disposiciones, fomento severamente la explotación de las instalaciones solares fotovoltaicas.

Por otra parte, en el ámbito regional, el gobierno de la CARM, derogó diversas disposiciones de la ley de aplicación regional 1/95 de protección del medio ambiente para las cuales se procedía a la simplificación de los trámites administrativos para la instalación de placas solares fotovoltaicas y se ampliaba los valores límite en cuanto a potencia generada por las instalaciones a 20 MW y las áreas de colectores de 5000 m² a varias hectáreas.

Estos hechos hicieron desplazar más si cabe, a la energía solar térmica en favor de la energía solar fotovoltaica momentáneamente. Este periodo de hegemonía de la energía solar fotovoltaica se ha visto recientemente interrumpido a raíz de la promulgación del R.D. 1578/2008, por el cual, en parte de sus disposiciones deroga prácticamente en su totalidad a las disposiciones descritas en el R.D. 661/2007 en materia de energía solar fotovoltaica.

Las nuevas disposiciones impuestas han supuesto una severa restricción en muchos ámbitos de las instalaciones fotovoltaicas que han supuesto una gran caída en el sector, que han hecho concentrar sus esfuerzos en la mejora y explotación de la energía solar térmica.

1.5.3.- Proyecciones de futuro para la Energía solar térmica.

A raíz del R.D.- 1578/2008, que ha supuesto grandes restricciones a la energía solar fotovoltaica, ha permitido que la energía solar térmica sea la principal beneficiada, siendo la misma ahora, objetivo prioritario de inversores y empresas.

A éste hecho, se suma la proximidad (no confirmada aun), de la promulgación de un real decreto que permita el uso y explotación de energía solar térmica en mayor proporción y por el cual se espera que se establezca un régimen de primas a los propietarios/beneficiarios de las instalaciones para destinarlas a asegurar la productividad de ACS en las mismas. No obstante, se cree que este hecho, de ocurrir no generará grandes beneficios a sus receptores, a fin de evitar la especulación surgida con la energía solar fotovoltaica.

Finalmente, y pese al pesimismo descrito, en la situación actual de la energía solar térmica, se espera con optimismo la mejora de la situación que atraviesa actualmente, que se ve agravada con la delicada situación económica existente y la gran caída del sector de la construcción.

1.6.- Actuaciones del gobierno de la CARM.-

1.6.1.- Introducción. Resumen marco de actuaciones.-

El gobierno regional de la CARM plantea el marco de actuaciones a través de la agencia de gestión energética en la Región de Murcia (ARGEM) y presenta como marco principal de actuaciones el fomento de la oferta y la demanda de energías renovables en la CARM. Asimismo, trabaja en colaboración con entidades públicas y privadas para realizar actuaciones en diversos puntos de la geografía regional investigando mejoras para un mayor aprovechamiento de las energías renovables.

1.6.2.- Campos de actuación en referencia a la energía solar térmica.-

La ARGEM presenta marcos de actuación en referencia a la energía solar térmica, con objeto de fomentar el uso de la misma y evitar que el desplazamiento legislativo que hasta ahora ha sufrido esta fuente de energía sea perjudicial para la misma.

De esta forma, en el año 2007, ARGEM en colaboración con diversas empresas del sector de la energía solar térmica, inició las gestiones para implantar el sistema ST-ESCOs (Solar Thermal Energy Services Company) en la CARM.

Este proyecto tiene como fin la creación de empresas que gestionen la instalación y mantenimiento de instalaciones solares térmicas, y propicien la energía obtenida a precios competitivos, inferiores a las fuentes actuales, en edificaciones de la CARM.

De esta forma, en el año 2007 se instaló una planta de captación de energía solar térmica a través de este sistema ST-ESCOs, que fue ubicada en el hospital universitario "Morales Meseguer" de la capital murciana. El precio de venta de la energía obtenida osciló sobre los 6 cent€/kwh, y se estableció una subida del coste energético en relación al IPC + un 1%. Se prevé una vida útil de la instalación de 15 años, fecha para la cual se ha fijado el convenio con la empresa instaladora. Para entonces, se prevé ahorrar la cantidad de 284000 litros de gasóleo para las diversas aplicaciones del complejo sanitario.

A tenor de los resultados obtenidos, la asociación de hosteleros de la ciudad de Murcia (HOSTEMUR), mostró su interés para el establecimiento de instalaciones solares térmicas en establecimientos hoteleros. Asimismo, se

han adherido empresas privadas y edificios de índole pública al programa que continúa hoy día dando sus frutos.

Por otra parte, ARGEM trabaja en conjunto con entidades privadas y públicas, el aprovechamiento de la energía solar para la climatización de edificios. En el año 2007 comenzó esta andadura realizando una instalación piloto en la localidad de Puerto Lumbreras, por la que se obtenía refrigerar un edificio público a través de este sistema. Recientemente, se ha incorporado a este programa el nuevo centro de nuevas tecnologías, energías renovables y empleo ubicado en la localidad de Molina de Segura, que ha presentado una versión mejorada del proyecto piloto ubicado en Puerto Lumbreras.

Ante tal iniciativa, instituciones públicas como UMU, UPCT Ayto. de Yecla y la cámara de comercio de Cartagena, han presentado su interés para la evolución y mejora de ésta nueva aplicación de la energía solar térmica.

Finalmente, ARGEM trabaja en el desarrollo de un *comité técnico de certificación de captadores solares térmicos*, en la que queda representada la entidad regional a través de un vocal. El objeto de este comité versará en la certificación por parte de la empresa AENOR y la empresa fabricante *Solar Keymark* de futuras instalaciones solares térmicas, contando así con criterios de evaluación en la producción de colectores, instalaciones solares térmicas y mantenimiento de las mismas.

1.7.- Información obtenida del Código Técnico de la Edificación referente a instalación, uso y mantenimiento de colectores solares térmicos.-

(Ubicada en la sección HE-4 del Código técnico de la Edificación del 29/09/06)

1.7.1.- Introducción.-

A finales de 2006 se produce la entrada en vigor del código técnico de la edificación, reglamento muy esperado para regular los principios fundamentales sobre la construcción, generalmente de nueva vivienda, cuyos reglamentos y disposiciones comenzaban a quedar algo obsoletos.

En este texto se disponen entre otras novedades, la imposición de una contribución de energía solar mínima con objeto de concienciar de la coyuntura actual energética: exceso de demanda y defecto de oferta de energías fósiles.

De ésta forma, entre sus disposiciones se cuenta con un capítulo para determinar la contribución de energía solar mínima, tanto fotovoltaica como térmica que, a partir de la entrada en vigor del citado texto, será obligatoria aportar a los edificios de nueva construcción y a todo aquel inmueble que presente proyectos de reforma integral.

Por todo ello, y por la trascendencia que conlleva la entrada en vigor de la citada legislación se considera oportuno dar buena cuenta de las disposiciones más remarcables en relación a la energía solar térmica, por ser la parcela de trabajo sobre la que versa el proyecto.

1.7.2.- Resumen de las disposiciones más destacables.-

En primer lugar, debemos remarcar que el Código Técnico de la Edificación (ahora CTE), se hará aplicable a los edificios de nueva construcción y rehabilitación de edificios existentes de cualquier uso en los que exista una demanda de agua caliente sanitaria y/o climatización de piscina cubierta.

Se contempla para ello, casos en los que las cantidades mínimas de energía previstas en el CTE puedan no ser alcanzadas, hecho que deberá ir remarcado en la memoria del proyecto que justifica su construcción e intentar conseguir los valores de optimización energética, equivalentes a la cantidad de energía perdida en la medida de lo posible.

1.7.3.- Condiciones que han de cumplir las nuevas instalaciones.-

Se abstraen tres criterios para establecer las condiciones necesarias que las instalaciones deberán cumplir:

- Aporte mínimo de energía exigido.
- Condiciones de diseño y dimensionado.
- Condiciones de mantenimiento.

→ Aporte mínimo de energía.-

El aporte de energía solar para la obtención de ACS no es el mismo en todos los puntos de la geografía española, se obtendrán unos valores de radiación menores más próximos al norte y viceversa. Para ello se presenta el mapa de regiones solares atendiendo a un criterio de clasificación que atiende al parámetro H, el cual se presenta como "*Radiación solar global media diaria anual sobre superficie horizontal*". En torno a unas cotas mínimas y máximas se establecen las zonas climáticas.

Como podemos observar en la figura 21, para el caso de la CARM se puede observar que se dispone de dos zonas climáticas (zonas IV y V), y que, en base a las mismas, debemos proceder al dimensionado y mantenimiento de las instalaciones para alcanzar los valores mínimos exigidos que presentamos en la tabla inferior.

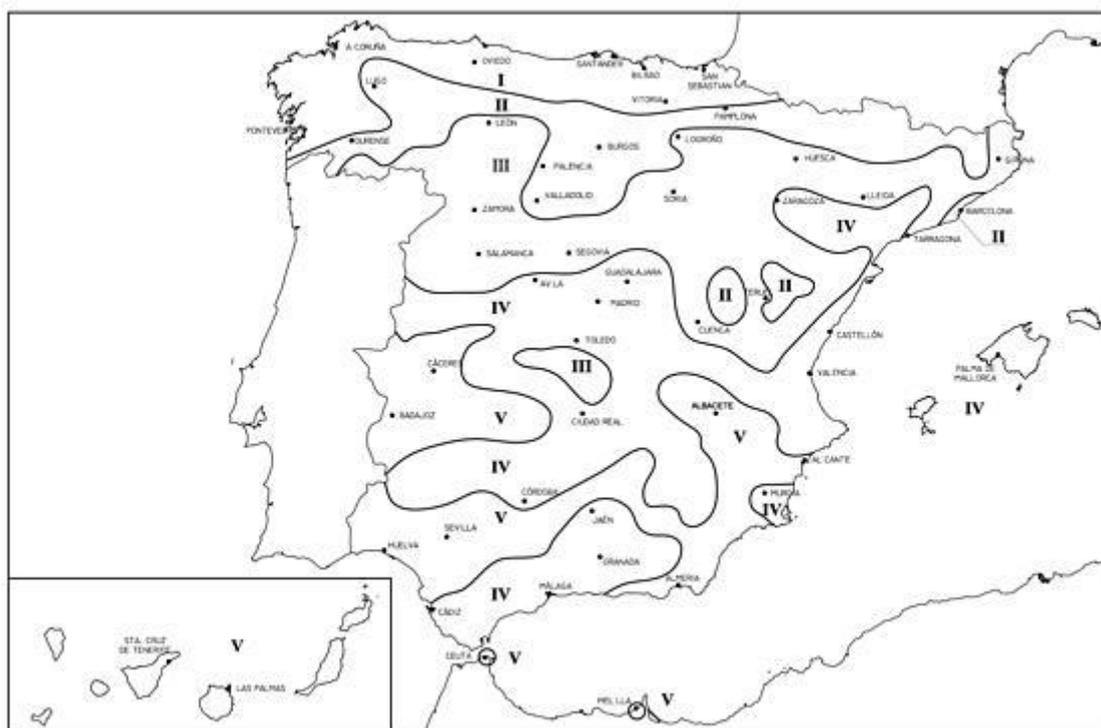


Fig. 21: Mapa representativo de las zonas climáticas del territorio español. (Fuente CTE)

Población	Zona climática
Águilas	V
Alcantarilla	IV
Caravaca de la Cruz	V
Cartagena	IV
Cieza	V
Jumilla	V
Lorca	V
Molina de Segura	V
Murcia	IV
Torre Pacheco	IV
Totana	V
Yecla	V

Tabla 4: Representación zonas climáticas por poblaciones en la CARM (Fuente CTE)

Zona climática	MJ/m ²	kWh/m ²
IV	$16,6 \leq H < 18,0$	$4,6 \leq H < 5,0$
V	$H \geq 18,0$	$H \geq 5,0$

Tabla 5: Representación de intervalos de H en las zonas climáticas de la CARM.

A continuación, se procede a tabular los valores de la contribución solar mínima en %. Para ello se distinguen dos tipos de aportación mínima en base al sistema de apoyo, que quedan debidamente tabuladas. En la primera se considera que el sistema de apoyo es el tradicional a gas natural,

gasóleo, propano, butano, etc. En la segunda se considera que la fuente de energía proviene de calentadores eléctricos de ACS efecto Joule.

Los valores de energía mínima exigidos están considerados para la obtención de ACS a 60°C y se obtiene a través de la fracción de los valores anuales de energía solar exigida y la demanda energética actual.

Demanda total ACS del edificio (l/d)	Zona climática	
	IV	V
50-5.000	60	70
5.000-6.000	65	70
6.000-7.000	70	70
7.000-8.000	70	70
8.000-9.000	70	70
9.000-10.000	70	70
10.000-12.500	70	70
12.500-15.000	70	70
15.000-17.500	70	70
17.500-20.000	70	70
> 20.000	70	70

Tabla 6: Contribución solar mínima en % para caso 1.

Demanda total ACS del edificio (l/d)	Zona climática	
	IV	V
50-1.000	70	70
1.000-2.000	70	70
2.000-3.000	70	70
3.000-4.000	70	70
4.000-5.000	70	70
5.000-6.000	70	70
> 6.000	70	70

Tabla 7: Contribución solar mínima en % para caso 2.

Además, en ningún mes del año la energía producida podrá superar el 110% de la demanda energética, siendo inferior al 100% para periodos de tres meses. En el caso de exceder el aporte energético de los máximos establecidos, los operadores de la instalación deberán tomar las medidas pertinentes para evitar tal hecho.

➔ **Condiciones de diseño y dimensionado.-**

Con objeto de conocer la demanda aproximada que tendrá la instalación a diseñar, el CTE tabula los valores aproximados para diversas aplicaciones de las instalaciones, siempre tabuladas para un consumo de ACS a 60°. En el caso de ser otra la temperatura requerida, se podrá calcular fácilmente con los datos facilitados en el CTE.

Criterio de demanda	Litros ACS/día a 60° C	
Viviendas unifamiliares	30	por persona
Viviendas multifamiliares	22	por persona
Hospitales y clínicas	55	por cama
Hotel ****	70	por cama
Hotel ***	55	por cama
Hotel/Hostal **	40	por cama
Camping	40	por emplazamiento
Hostal/Pensión *	35	por cama
Residencia (ancianos, estudiantes, etc.)	55	por cama
Vestuarios/Duchas colectivas	15	por servicio
Escuelas	3	por alumno
Cuarteles	20	por persona
Fábricas y talleres	15	por persona
Administrativos	3	por persona
Gimnasios	20 a 25	por usuario
Lavanderías	3 a 5	por kilo de ropa
Restaurantes	5 a 10	por comida
Cafeterías	1	por almuerzo

Tabla 8: Criterios de demanda de ACS en base a las principales aplicaciones de las instalaciones.

- Condiciones para el dimensionado de los equipos.

Las instalaciones deberán tener un circuito primario por el que circulará el fluido de trabajo mezclado con producto químico anticongelante, y un circuito secundario por donde circulara el agua de consumo, y si la instalación cuenta con más de 10 m², la circulación será forzada por bombas.

El **fluido de trabajo** podrá ser agua tomada de la red, pero siempre considerada entre unos límites de dureza. Asimismo, el agua deberá ir mezclada con fluido anticongelante. Ambas medidas se emplearan para proteger la instalación de depósitos en los conductos y a sobrecalentamientos respectivamente.

La **temperatura del fluido** no podrá exceder de 60°C. Si bien excede de éste valor, se deberá tomar agua de la red hasta conseguir que el agua final tenga la citada temperatura.

El **rendimiento** de las instalaciones deberá superar el 20%.

Los **captadores** podrán disponerse en filas conectadas entre sí en serie, en paralelo o en serie-paralelo. De esta forma, en cada fila, los colectores podrán ubicarse también en serie o en paralelo. Los captadores deberán tener un orificio por la parte inferior para evacuar posibles condensaciones y una placa identificativa que especificará sus condiciones de funcionamiento entre otros datos.

La entrada de agua a los **acumuladores** proveniente del circuito primario deberá realizarse entre un 50 y un 75% de la altura total del mismo. La salida de agua fría se realizará del fondo del acumulador y la salida hacia el circuito de consumo se hará por la parte superior del citado. Finalmente, el acumulador deberá incluir una placa identificativa con las propiedades de funcionamiento y el fabricante, además, deberá ir recubierto de un material aislante.

El **intercambiador** deberá tener una potencia mínima que será determinada en las horas centrales del día. Asimismo, deberá disponer de válvulas de cierre en las tuberías de entrada y salida de agua a fin de proteger al mismo de comportamientos no deseados del sistema. Se podrá hacer uso de un segundo intercambiador en el circuito de consumo si se considera procedente. Por último, el aporte realizado por estos equipos no deberá alterar la eficiencia del captador.

En referencia a las **bombas**, se deberán montar en línea en las zonas más frías del circuito evitando siempre cualquier tipo de cavitación y con el eje de rotación en posición horizontal. El fin que persiguen las bombas será el de hacer que la caída de presión se mantenga baja en todo el circuito. En circuitos superiores a 50 m² se deberán colocar dos bombas idénticas en paralelo en ambos circuitos, y para ambos casos los materiales de la bomba deberán ser compatibles con el fluido de trabajo usado.

El sistema de **tuberías** no debe dar lugar a la formación de obstrucciones o depósitos de cal. En el circuito primario, se podrán usar materiales como cobre y acero inoxidable. Para el circuito secundario se podrán usar los mismos materiales, contemplando si procede, materiales plásticos como alternativa.

Se concluye este apartado, referente a las condiciones más destacables del CTE sobre el dimensionado de las instalaciones de energía solar térmica, tratando los **sistemas de control** de la instalación tales como el sistema auxiliar, el sistema de medida y el de regulación.

El sistema de energía convencional auxiliar será obligatorio en todas las instalaciones y nunca deberá ir situado en el circuito primario de las mismas. Este sistema será diseñado para cubrir las necesidades en ausencia de la instalación solar.

El sistema de regulación y el sistema de medida trabajan de forma complementaria. El primero controlará a través los sistemas de medida, las distintas variables del sistema entre varios puntos de la instalación, operando en consecuencia con los datos obtenidos. Si, por ejemplo, la diferencia de temperaturas entre el sistema de captadores y el acumulador es menor de 2^o y mayor de 7^o, las bombas se pondrán en funcionamiento.

→ Condiciones de mantenimiento y control de pérdidas.-

En primer lugar, para esta sección debemos aclarar los tipos de pérdidas que pueden presentar esta clase de sistemas. Estos pueden ser por orientación e inclinación y por sombras.

En base a las primeras, éstas pueden surgir según la inclinación dada al colector en referencia al eje principal de coordenadas. Por otro lado, las

pérdidas por inclinación surgen por una mala elección en el ángulo de inclinación elegido para la situación del colector.

Las pérdidas por sombras se dan en áreas urbanas de forma mayoritaria y se consideran éstas por posibles sombras que puedan incidir sobre los colectores disminuyendo el rendimiento de los mismos al no aprovecharse toda el área de los mismos.

Ambos tipos de pérdidas se pueden cuantificar en base a unos métodos dados en el CTE por los que se pueden obtener los valores de pérdidas por sombras, orientación e inclinación. Estas pérdidas, deberán tener unos valores máximos que no podrán ser rebasados bajo ningún concepto. Según la disposición de la instalación, las pérdidas máximas podrán variar a saber, si los colectores se encuentran integrados en la estructura del edificio (integración arquitectónica), si estos se encuentran paralelos a la envolvente del edificio (superposición) o si se colocan de forma normal (general). En la tabla inferior quedan los valores de pérdidas máximas para cada tipo de disposición y según las pérdidas que se pueden dar.

Caso	Orientación e inclinación	Sombras	Total
General	10%	10%	15%
Superposición	20%	15%	30%
Integración arquitectónica	40%	20%	50%

Tabla 9: Pérdidas límite.

Finalmente, las consideraciones de vigilancia y mantenimiento de las instalaciones deberán ser constantes a lo largo de la vida útil de la instalación, siguiendo siempre las disposiciones dadas en el CTE sobre limpieza, cambio de fluido de trabajo, revisión de elementos de control y operación, etc.

1.8.- Objeto del proyecto.-

El objeto es estudiar la viabilidad de la introducción de muelles en espiral en los conductos de los captadores solares de parrilla como técnica de mejora de la transmisión del calor.

Para ello se pretende modificar los modelos ya existentes de transmisión de calor en captadores de parrilla, mediante la introducción de correlaciones específicas de transmisión de calor en tubos lisos y mejorados. Se persigue predecir la eficiencia térmica de captadores mejorados y sin mejorar, en función de las variables de operación típicas en captadores solares (gasto másico, fluidos de trabajo, irradiancia, velocidad del viento, etc). Se empleará, para ello, el software MATLAB como herramienta de cálculo, desarrollando un código a tal efecto. Se hará uso de correlaciones experimentales propias de transmisión de calor en tubos con muelles en espiral.

Se espera que los resultados obtenidos de las simulaciones sirvan de apoyo a la investigación experimental que el grupo investigador está llevando en captadores solares. Se pretende determinar qué rangos geométricos de los muelles incrementan más la eficiencia térmica de los captadores para posteriormente ser estudiados en la instalación experimental de ensayos de captadores solares.

1.9.- Fases del Proyecto.-

- Revisión bibliográfica.
- Estado actual de la Energía Solar Térmica en España y en la CARM.
- Definición del modelo matemático apropiado para captadores solares planos de parrilla.
- Desarrollo del código MATLAB para captadores liso y mejorado.
- Procesado de resultados. Estudio paramétrico de la influencia de las variables de operación en la eficiencia térmica de los captadores, para captador liso y mejorado.

CAPÍTULO 2: MEJORAS EN INSTALACIONES DE ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

2.1.- Introducción.-

Conforme a la evolución de la energía solar térmica, una serie de mejoras se han ido realizando para permitir, en todo momento, el mayor aprovechamiento de la energía solar térmica. En base a los estudios y técnicas de mejora realizadas, se pueden catalogar las mejoras realizadas a los sistemas solares térmicos en dos tipos:

- Mejoras referentes a la transferencia de calor.
- Mejoras físicas de la instalación.

En referencia a las mejoras de *transferencia de calor*, su objetivo principal será el de obtener una mayor transferencia energética y unos mayores rendimientos de los elementos de las instalaciones que intervienen en el fenómeno de la transmisión del calor.

Por otra parte, las mejoras *físicas* de la instalación, realizan la elección de mejores materiales para las instalaciones, mejores lugares de ubicación, dispositivos de control del sistema, entre otros. Estos elementos, de forma indirecta, también contribuirán a la transferencia de calor, a través de la mejora de la calidad y el funcionamiento de las instalaciones.

Tomando como base las investigaciones realizadas en las dos pasadas décadas, las mejoras del rendimiento de colectores solares planos han sido bastante gratas, debido principalmente a la alta eficiencia de los recubrimientos del absorbedor y la mejora de la calidad del contacto entre los conductos y el plato absorbedor.

Se han obtenido, asimismo, valores altos de absorción de energía solar y valores ya bastante bajos de emisión de radiación por parte de los colectores. Por otra parte, las mejoras de transferencia de calor andan un tanto menos evolucionadas.

Resulta sorprendente, que pese a la gran cantidad de estudios realizados, pocos de los mismos presenten ideas para la mejora del h_i , siendo esta última línea de investigación, de las pocas que restan para completar el rango de mejoras de rendimiento admisibles para las instalaciones de captación de energía solar térmica.

2.2.- Técnicas de mejora de transmisión del calor.-

Desde que se comenzó a trabajar en el estudio de la transmisión del calor, y con el comienzo de aplicaciones para las leyes y comportamientos que de estos estudios emanaban, se procedió a trabajar también en la optimización energética y la innovación con los conocimientos adquiridos.

Conforme al paso del tiempo, comenzaron a establecerse los intercambiadores de calor como elementos fundamentales en la industria en general, y su uso, diseño y operación han sido objeto de estudio desde su primera aplicación hasta hoy día que se siguen estudiando.

No obstante, las técnicas de mejora para la obtención de una mayor transmisión del calor, durante las dos últimas décadas, se han regido prácticamente a la clasificación realizada por dos de los grandes expertos en la materia, Bergles y Webb (1983).

Estos investigadores clasificaron las técnicas en dos grupos: activas o pasivas, dependiendo de si requerían o no de potencia externa. Dentro de estos dos grupos, describieron catorce tipos de técnicas de mejora. La mayoría de las técnicas de interés comercial son pasivas, producidas principalmente por configuraciones especiales de la superficie de intercambio de calor o por dispositivos insertados.

Las técnicas de mejora pasivas se clasifican en:

- 1.- *Superficies extendidas.* La adición de superficies lisas al área de intercambio de un intercambiador producirá un incremento del calor total intercambiado. Se trata de una práctica rutinaria en muchos tipos de intercambiadores, y puede ser considerada como una tecnología antigua.
Los aleteados exteriores son habituales en aerorrefrigerantes. En flujo interno, se emplean tubos con aleteados internos longitudinales. Además del efecto obtenido al incrementar el área de intercambio, se han propuesto geometrías diferentes a las lisas para incrementar también el coeficiente de transferencia de calor.
- 2.- *Recubrimientos superficiales.* Se trata de alteraciones a pequeña escala del acabado superficial. Se emplean en condensación y ebullición. La altura de la rugosidad es muy pequeña, del orden de 0,005 mm, y no afecta a la transferencia de calor monofásica. Existen

- también, recubrimientos de partículas mayores ($\approx 0,5$ mm) que mejoran la transferencia de calor en flujo monofásico.
- 3.- *Superficies rugosas.* Pueden estar integradas a una superficie base o bien formarse adhiriendo pequeños elementos a la pared (rugosidad no integral). En flujo monofásico se eligen configuraciones destinadas a promover la turbulencia, más que producir un incremento apreciable del área de intercambio. Las rugosidades integradas se forman por mecanizado o deformación en frío del tubo liso; ejemplos son los tubos corrugados o los tubos "dimpled". Como ejemplo de rugosidad no integral está la inserción de un muelle en espiral en un tubo, para crear elementos rugosos pegados a la pared y perturbar la capa límite.
 - 4.- *Elementos desplazados.* Se insertan en el flujo para aumentar de forma indirecta el transporte de energía en la superficie de intercambio. Se utilizan por igual en régimen monofásico y bifásico, y tienen la característica común de que se instalan cerca de la pared pero no están en contacto directo con ella. Un ejemplo de estos dispositivos es un muelle en espiral insertado en un tubo liso de mayor diámetro.
 - 5.- *Sistemas generadores de rotación.* Incluyen un amplio catálogo de arreglos geométricos o dispositivos insertados, que crean un flujo en rotación y/o un flujo secundario. Entre estos dispositivos están elementos insertados, como las láminas en espiral o los muelles en espiral, además de otras geometrías más complejas.
 - 6.- *Tubos en espiral.* Se trata de tubos lisos que se enrollan formando una hélice, creando un flujo secundario que aumenta el coeficiente de transferencia de calor en flujo monofásico y en la mayoría de aplicaciones en calderas. Sin embargo, hace falta que sean de un diámetro muy pequeño si se quiere una mejora significativa.
 - 7.- *Sistemas basados en la tensión superficial.* Consisten en ranurar la superficie para dirigir el flujo del líquido en condensación o ebullición.
 - 8.- *Aditivos para líquidos o gases.* Los líquidos se aditivan con partículas sólidas o con burbujas de gas mientras que los gases se

aditivan con gotas de agua o partículas sólidas. Además pueden emplearse dos o más técnicas de mejora simultáneamente para producir una mejora que podría ser mayor que la obtenida usando cada técnica por separado. Se hablaría entonces, de una mejora compuesta, denominada con la expresión inglesa "compound enhancement".

También en la misma línea, estudios como el de *Yang* (2000) y *Rabadi* (India, 2003), propusieron de forma paralela mejoras en intercambiadores de calor, a través del uso de tuberías curvadas.

Se destacarán estudios como el de *García* (Cartagena, 2007), proponen la inserción de dispositivos para una mayor transferencia del calor obteniendo mejoras notables en el coeficiente de transferencia.

2.3.- Estudios de mejora de la transmisión de calor en colectores solares térmicos. Antecedentes del proyecto.-

La aparición de la energía solar térmica como nueva aplicación para los intercambiadores de calor, ha hecho a este tipo de captación de energía renovable avanzar mucho en su corta andadura, ya que gran parte de las investigaciones llevadas a cabo para la mejora de transferencia del calor ya habían sido objeto de estudio.

Conforme al desarrollo de la redacción de esta memoria, se ha procedido a una revisión bibliográfica sobre estudios previos que han versado en la mejora de la transmisión del calor aplicada a instalaciones solares térmicas, de la cual se exponen a continuación las fuentes más destacadas.

Diversos estudios han corroborado que los avances obtenidos en la mejora de transmisión del calor pueden ser aplicables a la energía solar térmica. De este modo, el equipo de *Cortés* (1990) ya se lanzó a la mejora de colectores solares a través de la promoción de turbulencia en los conductos mediante tubos corrugados.

Prasad, B.N. (1988) y *Varum et al.* (India, 2007), propusieron el estudio del efecto de la rugosidad artificial en la transferencia del calor y el factor de fricción en un calentador solar de aire. El primero de éstos realizó inserción de láminas en espiral, descubriendo que la pérdida de carga que

experimentaba era mayor que la mejora en sí de la transmisión del calor, que se vio mejorada en un 30%.

Por otra parte, *Lambert, A.A.* (México, 2006), comenzó a proponer el uso de flujos laminares oscilatorios para mejorar la transferencia de calor en colectores solares de aire.

Dovic et al. (Croacia, 2008), propusieron mejoras en la soldadura de los conductos con el absorbedor, alegando que la mejora de éste detalle en el sistema de colección de energía podía suponer mejoras de hasta un 20% en el coeficiente de transmisión del calor.

Además de los estudios considerados para la mejora de la transmisión del calor en sistemas de colección de energía solar térmica, se han realizado investigaciones para obtener una mayor energía del sol realizando mejoras en la instalación (*Mejoras físicas*).

Asimismo, *Cindrella* (1991), propuso la colocación de conductos de aleación de cobalto y cadmio recubiertos con una capa de color negro, alegando que este sistema presentaba una mayor absorción y una menor emisividad. Por otro lado, *Pucar et al.* (2005), realizaron un estudio que versó sobre el efecto de luz difusa e indirecta que intervenía en la ganancia de energía térmica en los colectores. Este estudio concluyó proponiendo la instalación de colectores ajustables para tomar en todo momento la mayor cantidad de energía posible del sol.

Finalmente, para la redacción de este proyecto, se han considerado como fuentes más considerables, los siguientes que citamos, por sus similitudes a la línea de investigación del proyecto a realizar. Dichas fuentes son explicadas más detalladamente bajo estas líneas:

- KUMAR, A. PRASAD, B. N: "*Investigation of twisted tape inserted solar water heaters, heat transfer, friction factor and thermal performance results*" *Renewable Energy*, Vol. 19, pags. 379-398, año 2000.
- HOBBI, ALIREZA: "*Design of solar water heating systems for cold climate and study of heat transfer enhancement devices in flat plate solar collectors*". Director: Dr. Kamran Siddiqui, Concordia University (Montreal). Departamento de Ingeniería industrial y mecánica, Marzo de 2007.

- JAISANKAR, S. et al: "*Experimental studies of heat transfer and friction factor characteristics of thermosyphon solar water heater system fitted with spacer at the trailing edge of twisted tapes*". Applied Thermal Engineering 29 pags. 1224-1231, Julio 2007 (fecha recepción del artículo).

A continuación se procede a estudiar en detalle las fuentes tomadas y a discutir que tipo de investigaciones llevaron a cabo, destacando como principal las líneas más similares a las investigaciones realizadas por el equipo que suscribe.

2.3.1.- Kumar-Prasad.-

En referencia al artículo publicado por **Kumar y Prasad**, se aprecian datos relevantes para la investigación del grupo:

Se tiene un ensayo para analizar la mejora de colectores solares planos mediante inserción de muelles en el sistema de tuberías del absorbedor obteniendo mejoras notables. Las condiciones de operación de la experiencia son las siguientes:

- Reynolds sobre 12000 (se contempla que se mueve en rangos de Reynolds entre 4000 y 23000).
- Orientación de las placas: Inclinación de 43°
- Disposición de conductos en el colector: Serpentin (ensayos simultáneos).
- Tuberías de 1,6 cm de diámetro
- Intensidad de radiación solar entre 800 y 1000 W/m².
- $Nu_s/Nu = 1,3 + 2,88/y$ (Donde Nu_s/Nu es la mejora del número de Nusselt en base a la distancia y , e y es la distancia de paso entre espiras del muelle).
- Ensayo en el exterior en la franja horaria entre las 11 y las 14 horas.

Se obtienen como conclusiones principales que al insertar dispositivos en el sistema de tuberías que compone el sistema de colección, más en concreto en el absorbedor, se observan mejoras experimentales en el rendimiento de absorción de energía solar y mejoras notables en la transferencia de calor, fijando en un 30% el porcentaje mínimo de mejora del sistema.

Otra de las conclusiones destacables del citado artículo figura que, para un menor paso entre muelles, la transferencia de calor será mayor, presentando también una mayor pérdida de carga, hecho que se deberá tener en cuenta en el dimensionado de la instalación y en base a la relación de energía obtenida frente a energía invertida.

No obstante, tras la lectura del artículo por parte del equipo investigador se consideraron algunos puntos no muy detallados. Así, se observa que los valores de convección natural no son analizados, hecho demostrado al observar la disposición de los termopares en la instalación, ya que no contemplan la variación de temperatura en una misma sección transversal en ningún punto de la instalación.

Por otra parte, también se observa en el artículo un postulado por parte de Kumar y Prasad, por el cual se afirma que para una mayor radiación se obtendrán unos valores de transferencia de energía mayores, revirtiendo esto en un mayor rendimiento de transferencia de calor. Este hecho no es probado con medidas experimentales ni es basado en una experiencia concreta. La afirmación por parte de los investigadores está basada en una ligera tendencia de las medidas tomadas pero no ahondan en este dato. Se considerará, por parte del equipo investigador que suscribe, que este postulado no reviste de una veracidad total, ya que ésta debe ser demostrada.

2.3.2.- Alireza Hobbi.-

De la revisión documental realizada a la tesis de **Alireza Hobbi** se abstraen las siguientes conclusiones:

Se realiza un ensayo para observar la posible mejora al insertarle dispositivos de 4 tipos a los conductos del absorbedor. Se mide la transferencia de calor experimentada y se realiza el ensayo de forma experimental y a través del software TRANSYS.

- Valores de Reynolds: Oscilan entre 200 y 5500.
- Tipo de captador: Captador solar plano con eficiencias sobre el 50%
- Fluido de trabajo: Disolución Agua-Propilenglicol al 50%.
- Área de colector: 0,145 m².
- Diámetro conductos: 13,38 mm.
- Condiciones ensayo: Interior, colector sin inclinación.

Por parte del equipo investigador se han encontrado similitudes y divergencias hacia el artículo citado. Por una parte, se observa la consideración de la convección natural haciendo referencia a que los mecanismos de transmisión de calor que intervienen en la experiencia son principalmente la radiación y de forma menos relevante la convección mixta.

En base a las condiciones de operación dadas para el sistema, el equipo investigador encabezado por Alireza Hobbi concluye determinando que no se aprecian mejoras significativas para los 4 tipos de mejoras propuestas en el desarrollo de sus investigaciones. No obstante, se consideran algunas objeciones que el equipo investigador considera destacables y que fomentan una pequeña divergencia con las investigaciones que el citado equipo contempla.

En primer lugar, se observa que, pese a versar la investigación en un colector solar plano, que presumiblemente será empleado para la obtención de ACS en latitudes frías, no se recrean condiciones para el comportamiento de un sistema de captación solar real. Estos datos cabe destacarlos por la extremadamente reducida área del colector y la no inclinación del mismo. Se destacará también la no inclinación del colector en los ensayos además de la realización de los mismos en el interior con una lámpara tipo flexo que pretende "recrear" la radiación solar incidente en un colector. Por tanto, y a criterio del equipo que suscribe, pese al empeño de tratar de recrear las condiciones de termosifón empleando bajas velocidades de flujo, no se consigue con esta única consideración las condiciones de una instalación de captación de energía solar real.

Además, no refleja un criterio de ensayo ni datos experimentales para la experimentación del sistema en tubo liso, lo que no permite al lector comparar los datos para corroborar la no mejora postulada. También se destaca la influencia de la convección natural en la transferencia de calor pero no es medida experimentalmente, no se ofrecen datos experimentales que corroboren que exista un gradiente circunferencial de temperaturas.

Finalmente, y estando acorde a esta última conclusión el equipo que suscribe, se aprecia, por parte de los autores la gran necesidad de futuros trabajos a corto y largo plazo, además de practicar experiencias en exteriores y destaca la gran escasez de literatura referente a mejoras de colectores solares planos además de la necesidad de más investigaciones para una correcta mejora del funcionamiento de los mismos.

2.3.3.- Jaisankar.-

Por último, se procede a la revisión del artículo publicado por el grupo investigador de **Jaisankar**, del departamento de ingeniería química del instituto nacional de tecnología de la India.

En este artículo se observa la continuación de las mejoras en los conductos del absorbedor propuestas por Kumar y Prasad. Estas mejoras versaban en la inserción de dispositivos en los conductos a fin de obtener un flujo en espiral y favorecer el intercambio de calor, obteniendo mejores eficiencias del sistema instalado. Para el caso del equipo de Jaisankar se tiene la aplicación en un colector solar plano que emplea el sistema de flujo por termosifón. En el citado estudio expresa las siguientes condiciones experimentales:

- Área de colector: 1 m².
- Volumen tanque acumulador: 100 litros.
- Tuberías: Cobre con espesor de 0,3 mm y diámetro interior de 11 mm.
- Valor de paso entre muelles (γ): de 3 a 5.
- Ensayo: realizado en exteriores a lo largo del día.
- Distribución de los conductos en el colector: Distribución en parrilla.

Observamos así diferencias con las condiciones experimentales de los estudios realizados por Kumar y Prasad, en los que se realizaban las medidas entre las 11 y las 13 horas y la disposición de los conductos era en serpentín.

Las medidas son más convincentes y presenta una mayor toma de datos que los experimentos realizados anteriormente por Kumar y Prasad. A diferencia de los mismos, la expresión empleada para el cálculo del factor de fricción está basada en la ecuación de Fanning.

Las conclusiones obtenidas, en las que se expresa su mejora en el intercambio de calor para ambos tipos de dispositivos insertados, son análogas a las obtenidas por Kumar y Prasad, lo que conduce al equipo investigador que suscribe a plantear la mejora de la eficiencia térmica como una opción en la inserción de dispositivos en los conductos.

Como objeción a presentar en el artículo sobre las investigaciones llevadas a cabo, cabe destacar nuevamente la referencia a la convección como mecanismo principal de transmisión del calor en el sistema pero no

ahondando en el tipo de convección dominante, ni dando valores experimentales para tal fin.

Como conclusión, se deberá destacar que resulta sorprendente que una vía de investigación en auge por la coyuntura ambiental actual, haya sido tan poco evolucionada en comparación con lo que debería estarlo. Se cierra así la revisión bibliográfica concluyendo que son pocos los proyectos de investigación llevados a cabo para la mejora de este tipo de colección de energía y remarcando la necesidad de un mayor número de investigaciones para conseguir la mayor optimización posible en esta vía de energías renovables.

2.4.- Experiencia del equipo investigador.-

El equipo investigador, perteneciente al departamento de ingeniería térmica y de fluidos (en adelante, DITyF) de la Universidad Politécnica de Cartagena, comienza su singladura investigadora relacionada con la mejora de la transmisión de calor en sistemas de intercambio hace ya algo más de diez años. Desde entonces, sus miembros han llevado a cabo labores investigadoras amparadas en convenios con diversas empresas y entidades de la CARM, en relación, mayoritariamente a la mejora de equipos intercambiadores de calor, basándose en la mejora del coeficiente global de transmisión de calor para una mayor eficacia de los equipos.

Además, el equipo investigador del departamento docente ha establecido convenios con universidades como la Universidad Miguel Hernández de Elche y la Universidad de Jaén, para las cual ha establecido convenios de colaboración e investigaciones conjuntas, apareciendo algunas de sus conclusiones en publicaciones como "*The international journal of heat and mass transfer*" entre otras ediciones de prestigio en el mundo de la investigación de la mejora de transmisión del calor.

Por otro lado, el DITyF también ha enfocado sus investigaciones al aprovechamiento y mejora de las energías renovables, a través de estudios de simulación, modelado y operación de sistemas de obtención de energía solar térmica y diseños de software para un mejor control de las instalaciones.

Finalmente, el DITyF ha realizado convenios de colaboración también con la Agencia de Gestión de Energía de la Región de Murcia (ARGEM), dependiente de la conserjería de MM.AA. de la CARM, para la colaboración y apoyo en proyectos como el "*Mapa Solar de la Región de Murcia*",(2008) y el convenio de apoyo establecido para la realización de mejoras en instalaciones de energía solar térmica con el cual, este proyecto comienza, dando así al equipo investigador la experiencia necesaria y las capacidades suficientes para afrontar con éxito las investigaciones que a tenor del convenio firmado con ARGEM aparecen.

2.5.- Mejoras consideradas por el equipo investigador.-

A criterio del equipo investigador, las posibles mejoras para el coeficiente de transferencia del calor pueden ser acatadas a través de la inserción de dispositivos que mejorarían notablemente el rendimiento de la instalación y sus ventajas son destacables para tal fin.

La inserción de dispositivos en tubos lisos ha demostrado experimentalmente, en investigaciones de éste mismo grupo, ser una de las opciones más viables para la mejora de la transmisión del calor en instalaciones solares térmicas. No obstante, la elección del dispositivo correcto a insertar se plantea como cuestión que quedará respondida, una vez conocidas las aplicaciones y los regímenes de trabajo de la instalación donde serán ubicados.

Según Webb (1994), la inserción de dispositivos puede ser catalogada en cinco tipos que bajo estas líneas quedan destacados:

- 1.- *Láminas en espiral.* Las láminas guían el flujo provocando un giro en espiral a lo largo de la longitud del tubo. Como por lo general no existe un buen contacto térmico entre la pared interior del tubo y las láminas, éstas no actúan como aletas.
- 2.- *Elementos insertados de superficie extendida.* Se trata de formas extruidas insertadas en el tubo. Como existe un buen contacto térmico entre la pared y el elemento, éste actúa como una superficie extendida al mismo tiempo que reduce el diámetro hidráulico.
- 3.- *Muelles en espiral.* Consisten en un alambre enrollado en espiral, que funciona dentro del tubo como una rugosidad no-integral.

- 4.- *Mallados de alambre o cepillos.* Son alambres enrollados de manera más o menos aleatoria. Se consigue así un elemento con una alta densidad de material, destinado a perturbar una fracción grande del flujo.

- 5.- *Elementos insertados desplazados.* No están en contacto directo con las paredes del tubo y producen un mezclado periódico del grueso del flujo.

De entre las categorías presentadas, el equipo investigador considerará como objeto de estudio los **muelles en espiral**, considerando los mismos como la mejor opción para la obtención de mejores valores de transferencia de calor.

De entre algunas ventajas, destacamos las siguientes:

- Pueden ser aplicados en régimen laminar, donde la pérdida de carga admisible sea un factor determinante.
- La transición esperada a la turbulencia será más suave.
- Los muelles operarán más eficientemente ya que presentan una menor pérdida de carga.
- En régimen turbulento, no afectan a las propiedades mecánicas del conducto.
- Se esperan un mejor comportamiento en condiciones de ensuciamiento que otros dispositivos insertados.

Otra de las indiscutibles ventajas que presenta la inserción de muelles en espiral es el bajo coste de la inserción de las mismas y las posibles mejoras que pueden presentar, dando a estos dispositivos una mayor versatilidad ya que también pueden ser aplicados y retirados de las instalaciones con facilidad y sin tener que afectar al funcionamiento de la instalación, ya que en las propias operaciones de mantenimiento realizadas pueden ser insertados o retirados según convenga.

Además de impulsar la expansión de la energía solar térmica, el hecho de obtener valores mayores de energía por área de captador permitirá la reducción del área de los colectores para obtener valores aceptables de energía. Este hecho dará lugar a una mayor integración arquitectónica,

sobre todo en espacios urbanos, donde la falta de espacio se presenta como un problema para la expansión de este tipo de energía renovable.

No obstante, la revisión literaria demuestra los pocos estudios en este campo se han ido dando, ya que el estudio de la inserción de muelles en espiral ha sido históricamente descatalogado por desconocimiento absoluto de su comportamiento en los distintos regímenes de trabajo.

Aun existiendo pocos estudios sobre sus aplicaciones, algunos investigadores han otorgado a la inserción de muelles la oportunidad para operar en mejoras de transferencia de calor. De esta forma, los muelles se usan actualmente de manera satisfactoria en algunas aplicaciones como en calderas pirotubulares, como subrayan Zhang et al. (1991), o en mejoras de la mezcla turbulenta en quemadores Bunsen, investigadas por Rahai et al. (2002).

Otras aplicaciones las encontramos para el frontal de canales de enfriamiento de centrales nucleares de alta carga calorífica tal como concluyeron Collins et al (2001).

En estudios como el de García (2007), queda demostrado que la inserción de muelles mejora la transferencia del calor evitando las grandes pérdidas de carga que, por ejemplo, experimento Prasad en su estudio en 1988. Esta conclusión lleva al equipo investigador del departamento de Ingeniería térmica y de fluidos a investigar sobre la inserción de muelles en espiral para la mejora de la transmisión del calor en colectores solares térmicos.

Resumiendo, las mejoras propuestas pretenden promocionar la expansión del mercado de la energía solar térmica, además de obtener un mayor aprovechamiento de la energía solar y obtener mejores valores de absorción y evitar emitir la menor radiación posible.

CAPÍTULO 3: COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL COLECTOR LISO.

3.1.- Introducción.-

A lo largo de la redacción de este capítulo se procederá al desarrollo matemático por el que se pretende obtener las correlaciones pertinentes para predecir la posible mejora a realizar en los colectores solares. En primer lugar se revisarán los conceptos sobre los cuales se fundamentará el modelo matemático por el cual se dará cuenta de los resultados de los ensayos planteados de forma analítica.

El modelo matemático que se desea plantear, tiene como fin la obtención del calor que se obtiene de la radiación solar y que es transferido al fluido conductor del sistema primario de la instalación.

Para ello se planteará inicialmente un balance de potencia por el cual se persigue cuantificar el calor recibido por el fluido en el panel absorbedor. Dicho balance queda recogido en la siguiente expresión:

$$\dot{Q} = A_A \cdot [S - U_L \cdot (\bar{T}_{abs} - T_a)] \quad (3.1)$$

El valor de la potencia total absorbida por el captador (S) puede quedar definido con la siguiente expresión:

$$S = G \cdot (\tau_g \cdot \alpha_{abs}) \quad (3.2)$$

3.2.- Modelo térmico de captadores lisos de parrilla.-

La mayoría de modelos térmicos para captadores solares de parrilla, esquematizan el captador tal y como muestra la figura 22:

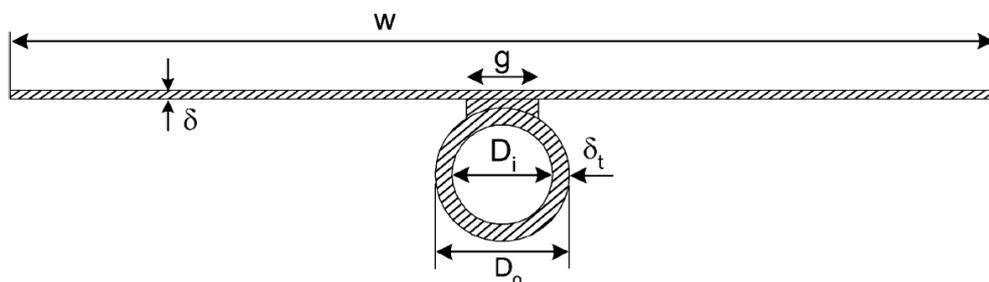


Fig. 22: Imagen ilustrativa de las variables físicas que intervienen en el modelo matemático (Fuente: Art. Eisenmann)

En el modelo lámina-tubo, el calor es tomado por la aleta y transmitido a la soldadura con el tubo, para que finalmente acceda el mismo a calentar el fluido que en el interior circula.

Se plantea así un balance energético por el que se persigue obtener la potencia tomada por el absorbedor. Para el planteamiento de este balance se considera despreciable el gradiente de temperaturas la placa y la temperatura del fluido dentro del tubo es uniforme se obtiene la siguiente expresión:

$$q_{aleta} = (w - g) \cdot F \cdot [S - U_L \cdot (T_b - T_a)] \quad (3.3)$$

La eficiencia de aleta queda recogida en la expresión:

$$F = \frac{\tanh\left(m \cdot \frac{w - g}{2}\right)}{\left(m \cdot \frac{w - g}{2}\right)} \quad (3.4)$$

Donde m será:

$$m = \left[\frac{U_L}{(k_{abs} \cdot \delta_{abs})} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.5)$$

Por otra parte se calculará el calor de la superficie de contacto.

$$q_{contacto} = g \cdot [S - U_L \cdot (T_b - T_a)] \quad (3.6)$$

$$q = q_{aleta} + q_{contacto} \quad (3.7)$$

$$q = w \cdot F' \cdot [S - U_L \cdot (T_f(y) - T_a)] \quad (3.8)$$

Aplicando las ecuaciones del modelo de Eisenmann, el factor de eficiencia del colector queda en la siguiente expresión.

$$F' = \left[w \cdot \frac{1}{(w - g) \cdot F + g} + \frac{U_L}{k_{gF} \cdot \pi \cdot D_i} \right]^{-1} \quad (3.9)$$

Se calcula la constante de transferencia de calor entre el fluido y la soldadura de la siguiente manera.

$$k_{gF} = \left(\frac{1}{c} + \frac{1}{S_\infty} \right)^{-1} \cdot \frac{k_f \cdot Nu}{\pi \cdot D_i / 2} \quad (3.10)$$

Donde c es un parámetro de conductancia de la soldadura.

$$c = \frac{k_{gd} \cdot g / 2}{k_f \cdot Nu} \quad (3.11)$$

Cálculo del factor de forma

$$S_\infty = \frac{\pi \cdot \eta_d}{2} + \frac{(1 + \eta_d) \cdot g / 2}{D_i} \quad (3.12)$$

Eficiencia de aleta del tubo.

$$\eta_d = \frac{\tanh \mu_d}{\mu_d} \quad (3.13)$$

Parámetro tipo Biot:

$$\mu_d = \left(\frac{\pi \cdot D_i}{2 \cdot \delta_{tubo}} - \frac{g}{2 \cdot \delta_{tubo}} \right) \cdot \sqrt{Bi} \quad (3.14)$$

Donde Bi es el parámetro Biot

$$Bi = \frac{h_f \cdot \delta_{tubo}}{k_{tubo}} \quad (3.15)$$

Que puede ser calculado también

$$Bi = \frac{Nu \cdot k_f \cdot \delta_{tubo}}{k_{tubo} \cdot D_i} \quad (3.16)$$

Para finalmente quedar μ_d de la siguiente forma

$$\mu_d = \frac{1}{2} \cdot (\pi \cdot D_i - g) \cdot \sqrt{\frac{Nu \cdot k_f}{D_i \cdot k_{tubo} \cdot \delta_{tubo}}} \quad (3.17)$$

Finalmente, se calcula el factor de remoción.-

Partiendo de la ecuación del calor:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_f \cdot (T_e - T_{in}) \quad (3.18)$$

$$\dot{m} \cdot c_f \cdot \frac{dT_f}{dy} = \dot{Q} = w \cdot F' \cdot [S - U_L \cdot (T_f(y) - T_a)] \quad (3.19)$$

Ordenando...

$$\frac{T_e - (T_a + S/U_L)}{T_{in} - (T_a + S/U_L)} = \exp\left(-\frac{U_L \cdot F' \cdot A_A}{\dot{m} \cdot c_f}\right) \quad (3.20)$$

$$T_e - T_{in} = \left(\exp\left(-\frac{U_L \cdot F' \cdot A_A}{\dot{m} \cdot c_f}\right) - 1\right) \cdot (T_{in} - (T_a + S/U_L)) \quad (3.21)$$

Igualando...

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_f \cdot (T_e - T_{in}) = A_A \cdot F_R \cdot [S - U_L \cdot (T_{in} - T_a)] \quad (3.22)$$

Finalmente se obtiene el factor de remoción.

$$F_R = \frac{\dot{m} \cdot c_f}{A_A \cdot U_L} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{U_L \cdot F' \cdot A_A}{\dot{m} \cdot c_f}\right)\right) \quad (3.23)$$

Y con éste, el valor de la temperatura del fluido a la salida del colector.

$$T_e = \frac{A_A \cdot F_R (G \cdot (\tau_g \cdot \alpha_{abs}) - U_L \cdot (T_{in} - T_a))}{\dot{m} \cdot c_f} + T_{in} \quad (3.24)$$

Cálculo de la temperatura media de absorbedor.

$$\bar{T}_{abs} = T_{in} + \frac{\dot{Q}}{A_A \cdot F_R \cdot U_L} \cdot (1 - F_R) \quad (3.25)$$

3.2.1.- Cálculo de pérdidas.-

Los tipos de pérdidas que pueden surgir en un colector solar térmico, son conducción, convección y radiación. Estos tres tipos de pérdidas de calor son inherentes al funcionamiento de la instalación y a su vez cuantificables para incluirlas en la expresión del balance energético inicial.

Considerando las pérdidas de calor por conducción, cabe destacar que las mismas ocurrirán a través de la propia superficie de la instalación que desprenderá calor por todas sus caras (laterales y fondo del colector).

El valor de las pérdidas de calor por conducción en el fondo del colector se considera a través de la constante de disipación del calor del material aislante ubicado en los fondos del mismo, y el espesor de la capa que este forma en el fondo del colector, todo ello recogido en la siguiente expresión.

$$U_B = \frac{k_{\text{aislante}}}{\delta_{\text{aislante}}} \quad (3.26)$$

Fig. 23: Expresión del cálculo de pérdidas de calor por el fondo del captador.

Las pérdidas de calor que suceden en los laterales (U_E) del absorbedor podrían ser despreciadas, no obstante, son consideradas en un factor U_{BE} que engloba las pérdidas por conducción tanto en los laterales como en el fondo del colector, y que viene dado en por la casa fabricante del colector.

Las pérdidas de calor por convección se darán desde dentro del absorbedor hacia afuera del colector, debido esto al movimiento del fluido que circula por el propio absorbedor que desprenderá calor hacia el panel absorbedor y éste, a través de la superficie de cristal del colector, hacia el exterior.

Finalmente, las pérdidas por radiación suceden también en la instalación a través del absorbedor por las elevadas temperaturas que alcanza.

Para la obtención del coeficiente de pérdidas de calor en la parte superior del captador es universalmente aceptada la correlación de Klein, y que bajo estas líneas queda indicada.

$$U_T = \left[\frac{N_G}{\frac{C}{\bar{T}_{abs}} \cdot \left[\frac{(\bar{T}_{abs} - T_a)}{N_G - f_w} \right]^e + \frac{1}{h_w}} \right]^{-1} + \frac{\sigma \cdot (\bar{T}_{abs}^2 - T_a^2) \cdot (\bar{T}_{abs} - T_a)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{abs} + 0.00591 \cdot N_G \cdot h_w} \right) + \left(\frac{2 \cdot N_G + f_w - 1 + 0.133 \cdot \varepsilon_{abs}}{\varepsilon_g} \right) - N_G} \quad (3.27)$$

En donde:

$$h_w = 5.7 + 3.8 \cdot u \quad (3.28)$$

$$f_w = (1 + 0.089 \cdot h_w - 0.1166 \cdot h_w \cdot \varepsilon_{abs}) \cdot (1 + 0.07866 \cdot N_G) \quad (3.29)$$

$$e = 0.43 \cdot \left(1 - \frac{100}{\bar{T}_{abs}} \right) \quad (3.30)$$

$$C = 520 \cdot (1 - 0.000051 \cdot \beta^2) \quad (3.31)$$

Por tanto, el valor del coeficiente global de pérdidas, U_L , será la suma de los valores de pérdidas de calor ya explicadas quedando la siguiente expresión:

$$U_L = U_E + U_B + U_T \quad (3.32)$$

Se deberá remarcar que todos los valores de pérdidas de calor presentan como unidad W/m^2K en SI.

3.3.- Desarrollo del modelo del captador solar liso en MATLAB.-

Se ha desarrollado un modelo de captador liso en MATLAB, a partir de las ecuaciones descritas en el apartado 3.2, con la particularidad de que han sido utilizadas correlaciones de transmisión de calor en tubos lisos para el cálculo del número de Nusselt en el captador. Este será usado para resolver las ecuaciones... (eisenmann, donde sale Nu).

Asímismo, se ha tenido en cuenta la variación local de las propiedades físicas del fluido en dirección axial.

3.3.1.- Correlaciones de transmisión de calor en tubos lisos.-

Para régimen laminar se empleará la correlación de Churchill y Ozoë (1973):

$$Nu = 4.36 \cdot \left[1 + (Gz/29.6)^2\right]^{1/6} \cdot \left[1 + \left(\frac{Gz/19.04}{\left[1 + (\text{Pr}/0.0207)^{2/3}\right]^{1/2} \cdot \left[1 + (Gz/29.6)^2\right]^{2/3}}\right)^{3/2}\right]^{1/3} \quad (3.33)$$

Nusselt para régimen turbulento se emplea la correlación de Gnielinski:

$$Nu = (\text{Re} - 1000) \cdot \text{Pr} \cdot \frac{\left[0.25 * (1.82 \cdot \log_{10} \text{Re} - 1.64)^{-2}\right] \cdot (1.07 + 12.7 \cdot \text{Pr}^{1/3} - 1)}{2} \cdot \left(\frac{\left[0.25 * (1.82 \cdot \log_{10} \text{Re} - 1.64)^{-2}\right]}{2}\right)^{1/2} \quad (3.34)$$

Donde los parámetros de flujo son:

$$\text{Pr} = \frac{\mu \cdot C_f}{K_f} \quad (3.35)$$

$$\text{Re} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_i \cdot \mu} \quad (3.36)$$

$$Gz = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{x/d}{\text{Re} \cdot \text{Pr}}\right)^{-1} \quad (3.37)$$

Se deberá considerar que, al tratarse de una operación de intercambio de calor, las propiedades del fluido en cada momento irán variando, y, para el desarrollo del modelo, se deberá atender a los valores puntuales de las propiedades físicas en cada momento, además de conferir una cierta precisión al mismo.

Por todo ello se han empleado una relación de ecuaciones que permite conocer, en base a la temperatura a la que se encuentra el fluido conductor y el porcentaje de polipropileno-glicol que contiene, conocer los valores de las propiedades físicas inherentes a los fluidos (entre otras viscosidad, calor específico, densidad y constante conductividad térmica).

- Calculo viscosidad:

$$B = 71.639163222 - 0.66981698459 \cdot T_{in} + 0.0019150513174 \cdot T_{in}^2 - 0.0000018587687783 \cdot T_{in}^3 \quad (3.38)$$

$$C = 0.270198804611 - 0.0012299975866 \cdot T_{in} + 0.0000015045427918 \cdot T_{in}^2 \quad (3.39)$$

$$\mu = e^{(B+C \cdot conc)} \quad (3.40)$$

- Calculo capacidad calorífica:

$$D = 3.8649883866 - 0.023691954902 \cdot conc - 0.00011278222908 \cdot conc^2 \quad (3.41)$$

$$E = 0.001023655712 + 0.000056633876714 \cdot conc \quad (3.42)$$

$$c_f = (D + E \cdot T_{in}) \cdot 1000 \quad (3.43)$$

- Calculo densidad:

$$F = 875.54696219 + 2.151387542 \cdot conc \quad (3.44)$$

$$G = 1.1191046068 - 0.0007599907262 \cdot conc - 0.000049236799989 \cdot conc^2 \quad (3.45)$$

$$H = -0.002377960199 - 0.0000091377252136 \cdot conc + 0.00000010872237562 \cdot conc^2 \quad (3.46)$$

$$\rho_f = F + G \cdot T_{in} + H \cdot T_{in}^2 \quad (3.47)$$

- Cálculo conductividad térmica fluido.

$$I = -0.78595253278 + 0.015561899561 \cdot conc - 0.000048933521576 \cdot conc^2 \quad (3.48)$$

$$J = 0.0076866167254 - 0.0001155974176 \cdot conc - 0.0000003660336083 \cdot conc^2 \quad (3.49)$$

$$K = -0.0000099976810237 - 0.000000145606 \cdot conc + (4.5879383578 \cdot 10^{-10}) \cdot conc^2 \quad (3.50)$$

$$k_f = I + J \cdot T_{in} + K \cdot T_{in}^2 \quad (3.51)$$

El modelo de MATLAB desarrollado desarrolla una iteración hasta converger suponiendo un valor de T_{abs} de partida y realizando un proceso iterativo hasta converger en el valor de la misma.

Sobre el valor de régimen obtenido, se deberá sopesar la expresión para el cálculo de Nusselt a emplear.

Una vez se tienen los datos y las ecuaciones de pérdidas se procede a la realización del modelo. A lo largo del desarrollo del mismo, se encuentra que el valor de T_{abs} no está disponible, por lo que se debe realizar un proceso iterativo hasta converger en el valor de éste. Así pues, se supone un valor

de T_{abs} y se realizan todos los cálculos correspondientes al modelo con ésta temperatura supuesta. Al final del mismo, y con los datos obtenidos, se obtendrá la temperatura de absorbedor calculada y será comparada con la supuesta. Una vez exista convergencia entre ambas, se dará por buena. En caso contrario, se variará el valor de la misma y se repetirá el proceso.

Se ha dividido la longitud del tubo del panel absorbedor en tramos de 0.01 metros y se aplican las iteraciones mencionadas para cada uno de los mismos. Se tienen, de este modo, un número "n" de *mini-captadores* compuestos por una fracción del tubo y del panel absorbedor. La resolución del modelo matemático se realiza para cada uno de estos *mini-captadores*. La temperatura de entrada al captador, será la de la entrada al primer tramo, y su temperatura de salida, será la temperatura de entrada del siguiente. La temperatura de salida del último tramo, será la temperatura final de salida del captador. Por otra parte, el calor útil del colector será la suma de todos los calores útiles de los tramos en que han sido divididos. La resolución de la temperatura de aleta en cada tramo, permite evaluar el campo global de temperaturas del panel absorbedor.

El detalle del modelo desarrollado se encuentra en el Anexo I.

3.4.- Obtención de curvas de eficiencia normalizadas para un captador comercial.-

Una curva de eficiencia de un colector solar plano consiste en la representación de la variación del rendimiento del colector respecto a los valores de diferencia entre la temperatura media de fluido y la temperatura de absorbedor. Deberán ser fijados el flujo másico y la irradiancia previos al ensayo.

El objeto de la obtención de la curva de rendimiento es bien sencillo. Esta curva representa el rango de valores de T_m^* en los que el colector dará su mayor rendimiento. El hecho de conocer esta curva indicará la utilidad de la misma para la aplicación deseada.

3.4.1.- Datos del captador.-

Las características del captador que ha sido modelado se presentan en la siguiente tabla:

Dato	Valor y unidades
u	0.5 m/s
σ	$5.67 \cdot 10^{-08} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
g_t	9.81 m/s^2
A_a	2 m^2
β	45°
N	1 vidrio
N_t	9 tubos
W	1.105 m
D_i	$7 \cdot 10^{-03} \text{ m}$
D_e	$8 \cdot 10^{-03} \text{ m}$
b	0.04 m
δ_{abs}	$5 \cdot 10^{-04} \text{ m}$
δ_{aislante}	0.025 m
δ_{tubo}	$5 \cdot 10^{-04} \text{ m}$
g	0.0035 m
G	800 W/m^2
T_a	293.15 K
L	1.83 m
T_g	0.95
α_{abs}	0.945
ϵ_g	0.88
ϵ_{abs}	0.05
k_{aislante}	0.045 W/mK
$k_{\text{absorbedor}}$	209.3 W/mK
k_{tubo}	372 W/mK
g_d	3600 W/mK
q	$72 \text{ Kg/h} \cdot \text{m}^2$

Tabla 10: Datos de la instalación.

Se tiene, por parte del fabricante, el informe de las curvas de eficiencia suministrado por la empresa de certificación CENER. Estas curvas de eficiencia se han obtenido en ensayos "indoor", siguiendo las especificaciones de la norma UNE-EN 12975-2.

Las siguientes ecuaciones se utilizan para la obtención de las curvas de primer y segundo orden respectivamente:

$$\eta = h_0 - h_1 \cdot \left(\frac{t_{in} - t_a}{G} \right) \quad (3.52)$$

$$\eta = \eta_0 - a_1 \cdot \left(\frac{t_{in} - t_a}{G} \right) - a_2 \cdot G \cdot \left(\frac{t_{in} - t_a}{G} \right)^2 \quad (3.53)$$

Donde

$(T_{in}-T_a)/G$: Temperatura adimensional (T_m^*)

h_0, η_0 : Valor de eficiencia del colector para $T_m^*=0$

h_1, a_2, a_1 : coeficientes de pérdidas térmicas del ajuste.

Los valores suministrados por el fabricante son:

Ajuste lineal	
Variable	Valores
h_0	0,787
h_1	4.653

Tabla 11: Valores ajuste lineal para el colector del fabricante.

Ajuste 2º Orden	
Variable	Valores
η_0	0,799
a_1	3,4
a_2	0,026

Tabla 12: Valores ajuste 2º orden para el colector del fabricante.

Las curvas de eficiencia han sido obtenidas para un gasto másico de 72 Kg/h·m² y agua como fluido de ensayo.

3.4.2.- Obtención de curva de eficiencia normalizada.-

Se procede, a continuación, a validar el modelo matemático desarrollado. Para ello se tratará de recrear la curva de eficiencia facilitada por el fabricante a través de la aplicación MATLAB. De este modo, se validará el método y se proseguirá en el desarrollo del mismo.

En primer lugar, tras el desarrollo del modelo matemático, se deberán obtener los valores de h_0 y h_1 para confirmar su semejanza con los valores facilitados por el fabricante. Para ello se hace uso de la herramienta "POLYFIT" del software MATLAB, a través de la cual se obtendrán los citados valores.

A continuación, se tabulan los valores de irradiancia, caudal, velocidad del viento y concentración de polipropileno-glicol empleados para la obtención de la curva de eficiencia, simulando un ensayo "indoor", de acuerdo a la norma UNE-EN 12975-2. Los cálculos se han realizado empleando el mismo fluido (Agua) y gasto másico (72 kg/h·m²) que en los ensayos de certificación llevados a cabo por el CENER.

Variable	Valores	Unidades
q	72	Kg/h·m ²
u	0.5 - 1 - 1.5 - 3	m/s
Concentración	0	% Polipropileno-glicol
G	700 - 800 - 900 - 1000	W/m ²
T ^a entrada	17.5, 20, 40, 55, 60, 70, 80, 90	K

Tabla 13: Valores a analizar en la validación del modelo de 1er. Orden.

Variable	Valores	Unidades
q	72	Kg/h·m ²
u	0.5 - 1 - 1.5 - 3	m/s
Concentración	0	% Polipropileno-glicol
G	850	W/m ²
T ^a entrada	17.5, 20, 40, 55, 60, 70, 80, 90	K

Tabla 14: Barrido de variables a tomar en validación curva 2ºorden.

El hecho de no realizar un barrido de irradiancias para la obtención de la curva de segundo orden, se debe a aproximar el comportamiento del colector a un punto de irradiancia medio. De este modo, se obtendrán valores más representativos y más próximos a la curva facilitada.

- **Resultados de curva de eficiencia de 1er. Orden:**

Los resultados de las simulaciones en las condiciones descritas en la tabla 1 se muestran en la siguiente figura:

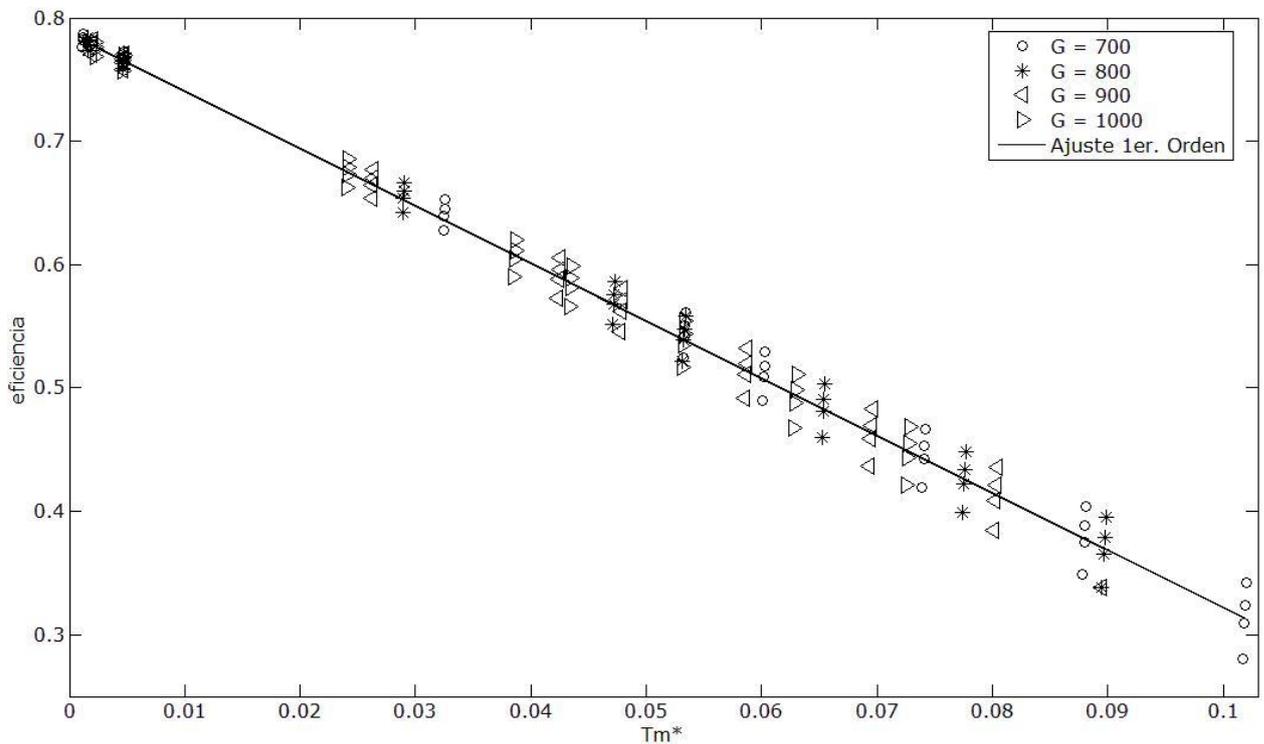


Fig. 24: Curva comparativa para validación modelo 1er. Orden.

La tabla siguiente muestra los coeficientes de la curva de eficiencia de 1er. Orden en comparación a los suministrados por el fabricante.

Variable	Valor fabricante	Valor modelo	% desviación
h_0	0.787	0.7878	+0.1
h_1	-4.653	-4.6495	-0.07

Tabla 15: Comparativa valores obtenidos/valores Fabricante para recta 1er. Orden.

Se observa que las variaciones son mínimas. Este hecho corrobora la validez del modelo realizado en MATLAB

- **Resultados de curva de eficiencia de 2º Orden:**

De forma análoga, se estudia la validez del método para las curvas de eficiencia ofrecidas por el CENER para los colectores del fabricante. Para el caso de las curvas de eficiencia se hará un estudio en las condiciones siguientes:

Para éstas mismas condiciones empleadas por el CENER, se obtiene la siguiente ecuación de curva de eficiencia:

$$\eta = 0.799 - 3.4 \cdot \left(\frac{t_m - t_a}{G} \right) - 0.026 \cdot \left(\frac{t_m - t_a}{G} \right)^2 \quad (3.54)$$

Una vez realizado el barrido, se obtienen la siguiente representación:

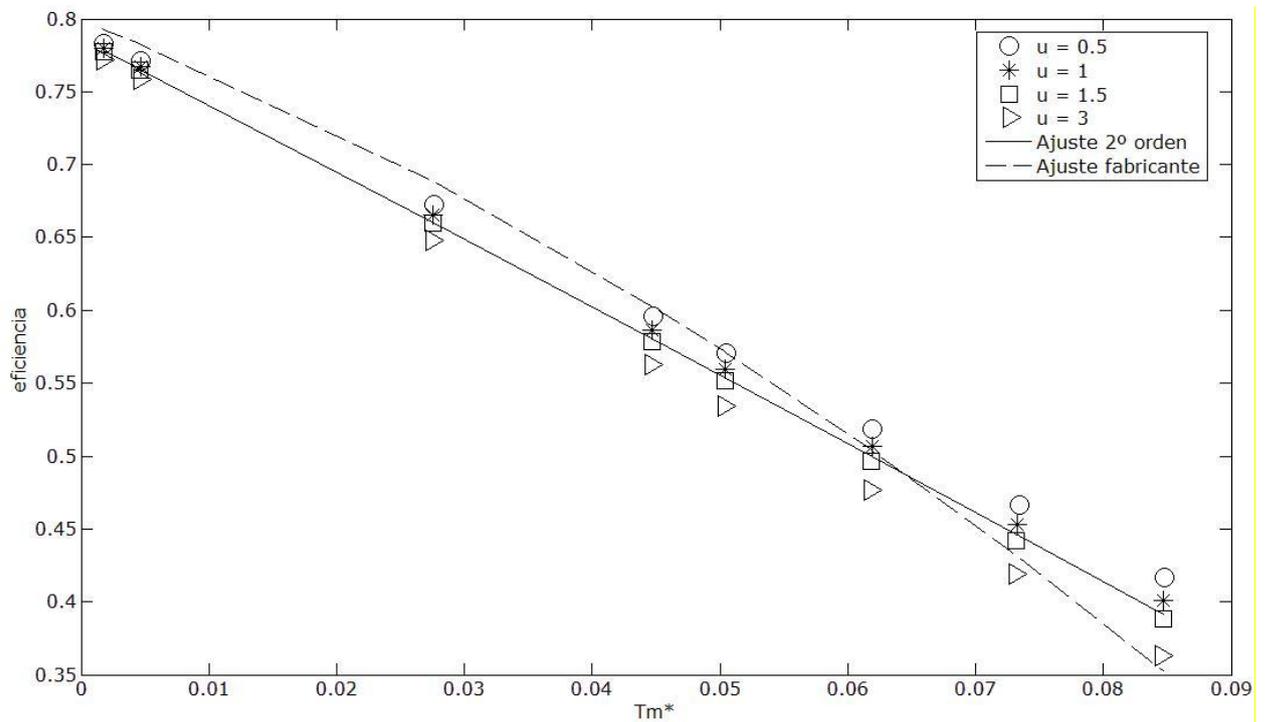


Fig. 25: Gráfica comparativa para validación modelo 2º orden.

Por otro lado, haciendo uso de la herramienta POLYFIT, del software MATLAB, se obtendrá la siguiente expresión de 2º orden:

$$\eta = 1.4794 - 4.54 \cdot \left(\frac{t_m - t_a}{G} \right) - 0.7865 \cdot \left(\frac{t_m - t_a}{G} \right)^2 \quad (3.55)$$

Finalmente, si se realiza un cuadro comparativo con las variables que intervienen en la ecuación de la curva de 2º orden se desprenden los siguientes datos.

$$\eta = \eta_0 - a_1 \cdot \left(\frac{t_m - t_a}{G} \right) - a_2 \cdot \left(\frac{t_m - t_a}{G} \right)^2 \quad (3.56)$$

Variable	Valor fabricante	Valor modelo	% desviación
η_0	0.799	0.7865	+1.59%
a_1	3.4	-4.54	+233.5%
a_2	0.026	-0.00174	106.7%

Tabla 16: Comparativa valores obtenidos/valores Fabricante para curva 2ºorden.

Se observan grandísimas variaciones respecto al modelo calculado y los valores obtenidos por CENER, presentando variaciones de hasta el 97% aproximado respecto a a_2 . Se prueba a realizar el estudio con otros valores para la variable g_d , preferentemente aumentando el valor de la misma, obteniéndose resultados con diferencias aún mayores. Por ello, el equipo investigador opta realizar todos los estudios paramétricos en el modelo liso, a través de las rectas de eficiencia, con una aproximación muy precisa y, a la vista, difícilmente superables por las curvas de eficiencia obtenidas en el modelo realizado.

Es de sobra conocido, para el equipo investigador, que las curvas de eficiencia presentan una mayor difusión técnica y comercial, pero ante la imposibilidad de representar dichas curvas, con la precisión obtenida en las rectas de 1er. Orden, se deberá trabajar con las rectas de eficiencia. Dichas rectas son igualmente válidas y mostrarán resultados muy aproximados a los que se puedan abstraer de las curvas de eficiencia.

3.5.- Estudio paramétrico de influencia de variables en la eficiencia del colector.-

Una vez ha quedado comprobado que el modelo analítico a aplicar es correcto, se ejerce un estudio sobre la influencia de las variables más destacables que intervienen en el mismo. Se tendrá como fin conocer la influencia de las mismas en el valor de eficiencia del colector.

Para ello, en primer lugar se deberá definir un "punto de funcionamiento", a través del cual se fijará un estado estándar en la vida útil del colector. Sobre éste estado, se analizará el efecto de la variación de cada una de las variables, dejando el resto fijas en sus valores de "punto de funcionamiento".

Variable	Valores	Unidades
u	1.5	m/s
G	850	W/m ²
Concentración	0	% Polipropilenglicol
Gasto másico	72	Kg/h·m ²

Tabla 17: Valores de las variables en el punto de funcionamiento definido.

Por otro lado, se presentan los valores que las variables tomarán a lo largo de éste estudio paramétrico.

Variable	Valores	Unidades
u	0.5 - 1 - 1.5 - 3	m/s
G	700 - 800 - 900 - 1000	W/m ²
Concentración	0,20,30,40,44,50,60	% Polietilenglicol
Gasto másico	30,60,72,90,100,120	Kg/h·m ²
T ^a entrada	17.5, 20, 40, 55, 60, 70, 80, 90	K

Tabla 18: Rango de valores a tomar en el estudio del modelo liso.

Seguidamente, se procede al barrido de variables. Con la ayuda del Software MATLAB, se obtendrán las representaciones gráficas que conducirán a las conclusiones de este estudio. Se deberá destacar que el estudio se realiza con las rectas de eficiencia (1er. Orden), ya que los valores obtenidos de

forma analítica desprenden una mayor precisión que para las curvas de rendimiento (2º orden).

3.5.1.- Influencia velocidad del viento (u) en la eficiencia del colector.-

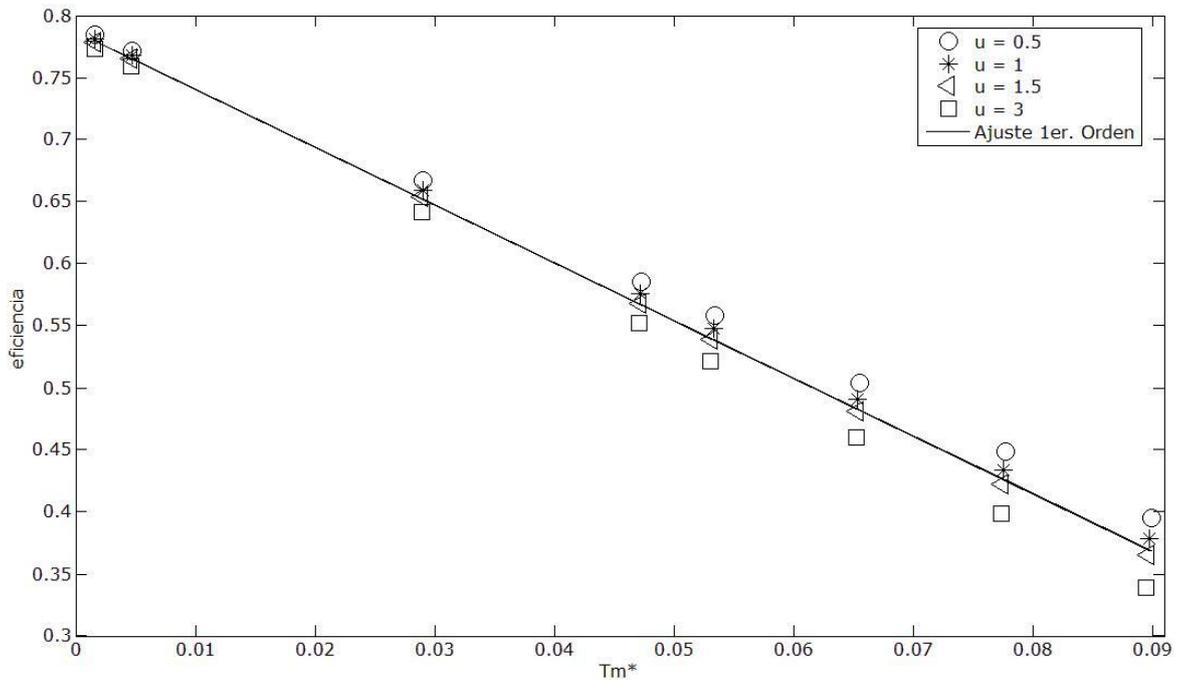


Fig. 26: Influencia u sobre eficiencia del colector.

Valor u	Dif. mínima fabricante (%)	Dif. Fabricante para $T_e = 328k$ (%)	Dif. máxima fabricante (%)
0.5	+0.64	3.31	+7.02
1	+2.18	1.515	+2.43
1.5	-0.12	0.08	-1.16
3	-0,79	-2.85	-8.6

Tabla 19: Diferencia de valores de u para rectas de eficiencia respecto recta dada por el fabricante.

Para una mayor velocidad del viento, se puede ver cómo la eficiencia del colector disminuye. Es destacable cómo para el valor de velocidad $u=1.5$ m/s se aproxima de forma pronunciada a la recta de eficiencia definida por el fabricante. El hecho de la disminución de la eficiencia conforme a la

velocidad del viento era esperable, aunque queda así, demostrado analíticamente.

La tabla anterior presenta los valores de variación de los datos obtenidos para cada valor de u respecto de la recta del fabricante. Se corrobora sobre ella, que los valores presentan mayor variación a mayor valor de T_m^* y la similitud de la recta para $u=1.5$ m/s con la recta del CENER.

3.5.2.- Influencia irradiancia (G) en eficiencia del colector.-

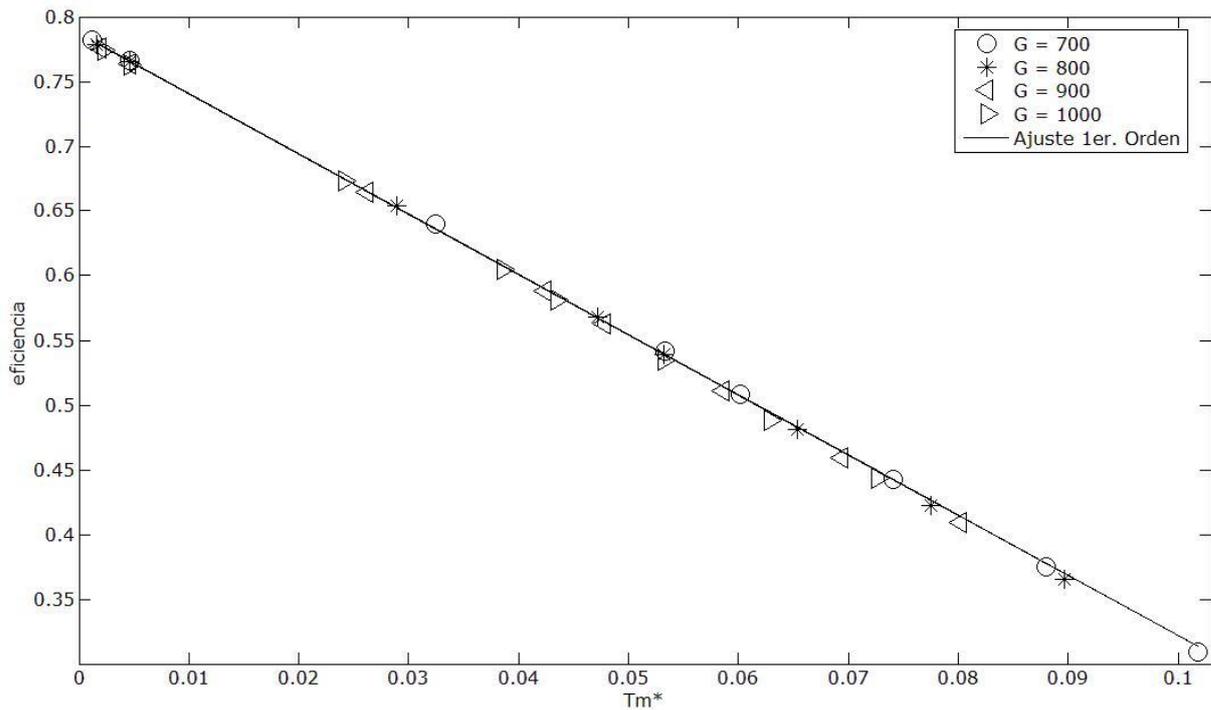


Fig. 27: Influencia G sobre eficiencia del colector.

Valor G	Dif. mínima fabricante (%)	Dif. fabricante para $T_e = 328k$ (%)	Dif. máxima fabricante (%)
700	0.025	0.4636	-1.1
800	-0.12	0.08	-1.16
900	-0.2442	-0.22	-1.2
1000	-0.36	-0.43	1.2

Tabla 20: Diferencia de valores de G para rectas de eficiencia respecto a la recta del fabricante.

A tenor de los datos obtenidos, se puede concluir que la irradiancia influye de forma leve en la temperatura media adimensional del colector, sin

presentar una tendencia concreta en los valores obtenidos en diversas irradiancias.

Tal como se observa en la grafica y se confirma en la tabla de diferencias respecto al fabricante, las diferencias entre los valores "referencia" y los obtenidos son mínimas, y no siguen una tendencia concreta.

3.5.3.- Influencia caudal (q) en eficiencia del colector.-

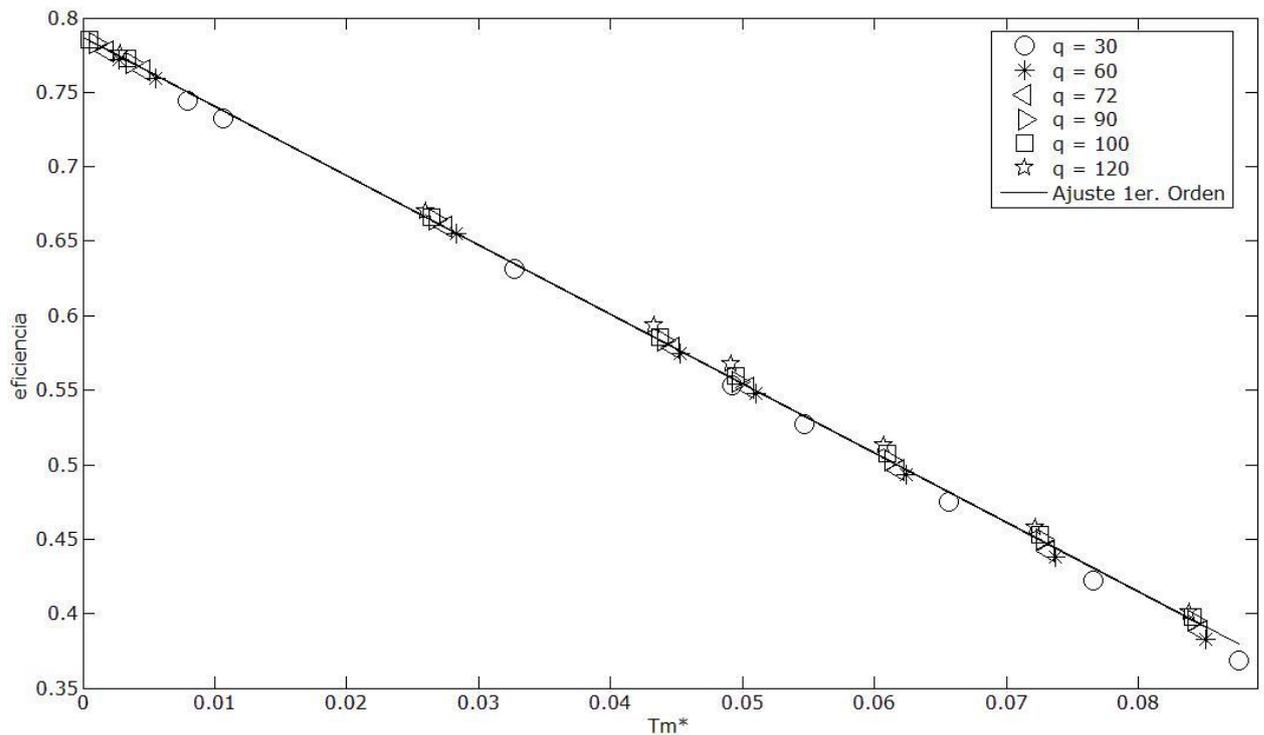


Fig. 28: Influencia caudal sobre eficiencia del colector.

Valor caudal	Dif. mínima fabricante (%)	Dif. Fabricante para $T_e = 328K$ (%)	Dif. máxima fabricante (%)
30	-0.7596	-0.85	-2.82
60	-0.3	-0.24	-2.07
72	-0,17	-0.08	-1.1
90	-0.01	0.1	0.025
100	0.07	0.377	0.45
120	0.216	1.45	1.03

Tabla 21: Diferencia de valores de caudal para rectas de eficiencia respecto a la recta Del fabricante.

Se puede observar que para todos los caudales, excepto para 30 l/h·m², se obtienen valores muy similares. Para q= 30 se puede concluir que para valores de T_m* menores, se asimila al resto de caudales, mientras que al aumentar este valor, las diferencias con el resto de caudales se hacen algo más notables. En referencia a las diferencias entre los valores abstraídos y los valores del fabricante, se observa como los valores no toman una tendencia concreta, si bien, se puede concluir que tienen a aproximarse para posteriormente alejarse mínimamente.

3.5.4.- Influencia concentración en eficiencia del colector.-

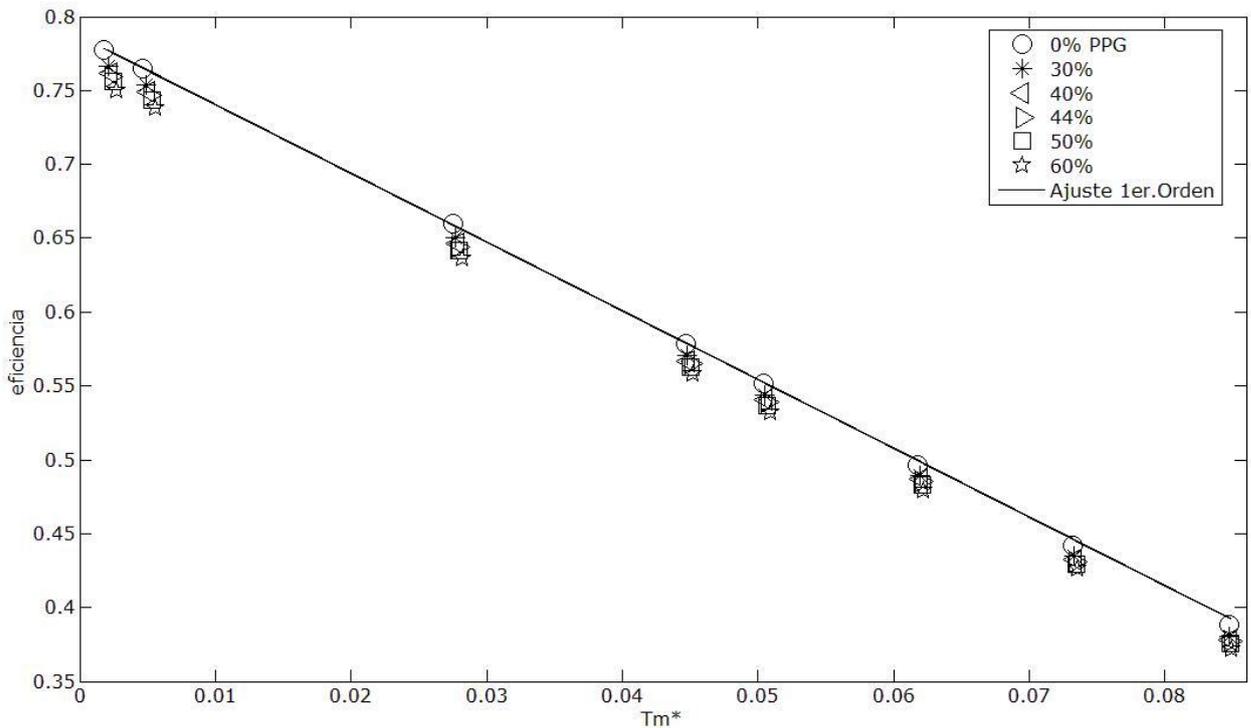


Fig. 29: Influencia concentración PPG sobre eficiencia del colector.

Valor conc.	Dif. mínima fabricante (%)	Dif. Fabricante para T _e = 328K (%)	Dif. máxima fabricante (%)
0	-0.1	-0.08	-1,17
30	-1.41	-1.36	-3.1
40	-1,91	-1.90	-3.7
44	-2.14	-2.14	3.9
50	2.4	-2.5	-4.3
60	-3.1	-3.8	-5

Tabla 22: Diferencia de valores de concentración para rectas de eficiencia respecto a la recta del fabricante.

Se puede observar que para una mayor concentración de polietileno-glicol en el circuito primario del colector, se tendrá una menor eficiencia. Este hecho era también esperable por el equipo que suscribe, ya que el polipropileno-glicol, en disolución con el agua, afecta a los valores de Re y a la viscosidad de dicho fluido conductor. No obstante, el polipropileno-glicol deberá estar presente en cierta proporción que deberá ser estudiada para las condiciones atmosféricas en las que será expuesto.

Se observa en la tabla que la diferencia de los valores obtenidos respecto a los valores del fabricante, aumenta conforme se aumenta el valor de T_m^*

CAPÍTULO 4: COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL COLECTOR MEJORADO.

4.1.- Introducción.-

Una vez realizado el modelo matemático que define el comportamiento del colector y analizado el comportamiento del mismo para un rango de temperaturas de entrada, caudales, irradiancias, concentraciones de polipropileno-glicol, y velocidades del viento incidentes sobre el colector, se procede en este capítulo a analizar y verificar la posible mejora que propone el equipo que suscribe.

Para ello, en primera instancia, se realiza una presentación de los dispositivos a insertar en los tubos del panel absorbedor y se procederá a desglosar los parámetros que definen su geometría. Acto seguido, se aplicarán en el modelo matemático obtenido en el capítulo anterior y se extraerán conclusiones sobre el comportamiento del sistema con los dispositivos insertados.

4.2.- Caracterización de los muelles. Parámetros.-

Tal como se ha redactado en capítulos anteriores y como versa el título de este proyecto, se estudia la mejora de la eficiencia del colector a través de la inserción de muelles en los tubos del panel absorbedor.

Previos al uso de los mismos, se deberá remarcar la forma de caracterizar a los mismos, conociendo su determinación y nomenclatura. Dichos valores serán los siguientes:

- Paso del muelle, (p): Se denomina paso del muelle a la distancia de avance del muelle para dar un giro completo de 180° .
- Espesor del muelle (e)
- Diámetro del muelle (d)

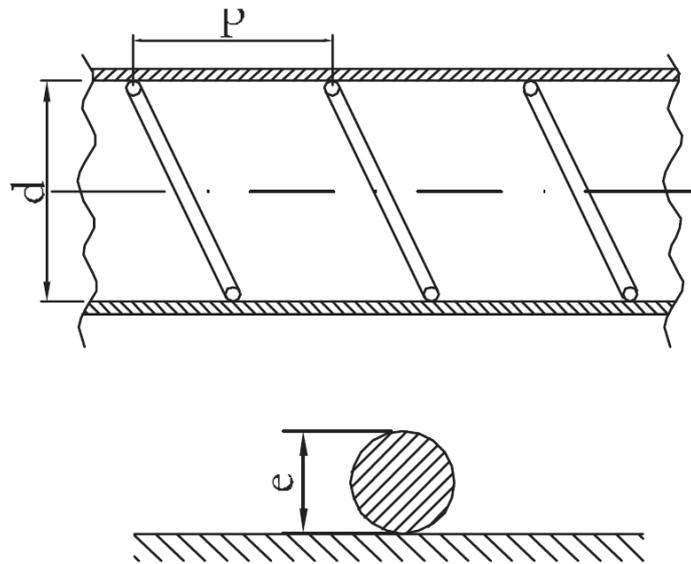


Fig. 30: Representación gráfica parámetros caracterización del muelle (Imagen tesis doctoral A. García, 2006).

Por otro lado, se definen también los valores denominados “parámetros adimensionales”, que también caracterizan la geometría de los muelles. Dichos valores son los siguientes:

- Paso adimensional (p/d)
- Espesor adimensional (e/d)
- Relación paso-diámetro de hilo (p/e).

Existen otras variables que aportan más información para la caracterización de los muelles en espiral, tales como el ángulo de hélice (α), que describe la inclinación sobre la horizontal del muelle sobre la que se encuentran las espirales del muelle.

Sobre estos datos se trabajará el ensayo, considerando los mismos suficientes para el conocimiento de la geometría del muelle para la aplicación deseada.

4.3.- Estudios anteriores sobre el uso de muelles en el panel absorbedor.-

Además de los estudios de mejora realizados por Prasad (1988), Kumar, Prasad (1999), Jaisankar et al. (2008), y Hobbi (2007), cuyos contenidos han sido ya revisados y detallados en capítulos anteriores, el estudio de la inserción de dispositivos para la mejora de la eficiencia de colectores solares térmicos ha evolucionado en el departamento de ingeniería térmica y de fluidos de la UPCT.

De este modo, y tras la prospección documental correspondiente, el departamento comenzó la línea de investigación en la que se incluye el presente proyecto, y de la cual, hasta la fecha de la redacción del mismo, ya han emanado resultados.

De un lado, *Alberto García Pinar (2006)*, en su tesis doctoral, estudió la mejora de transmisión del calor a través de tubos corrugados y dispositivos insertados.

Por otra parte, y, siguiendo la línea trazada por el departamento, *Elena López Galiana (2009)*, comenzó a modelar una instalación solar térmica y a prever las postuladas mejoras a través del software TRNSYS. Para el caso de López, la inserción del muelle se centró en un p/d de 1.65 y un e/d de 0.07, demostrando una leve mejora en la eficiencia del sistema para las condiciones dadas.

Continuando la senda marcada, *Agustín Villa Ortiz (2010)*, realizó ensayos a la instalación solar térmica a través del software TRNSYS, probando un rango más amplio de muelles con diferentes pasos adimensionales y distintos espesores, lo que llevó también a resultados positivos en la línea de investigación.

Finalmente, en este proyecto, el que suscribe, pretende realizar mejoras e investigar los resultados obtenidos por García y Villa, mediante la inserción de muelles en un modelo matemático a través del software MATLAB, dando lugar a nuevos resultados, que, al final de la redacción del presente, serán comprobados con los obtenidos hasta la fecha.

Por todo ello, y para seguir la línea marcada por los antecesores a este proyecto, se procederá a realizar un estudio del comportamiento de la instalación solar térmica, adaptando el modelo matemático realizado en el

capítulo anterior y verificado por los datos obtenidos del fabricante, para introducir sobre el mismo varias geometrías de muelles, persiguiendo como fin la obtención de resultados concluyentes para finalizar la fase analítica de esta línea de investigación que marca el DITF.

4.4.- Correlaciones para la obtención de Nu para muelles.-

Para la obtención del número de Nusselt al introducir muelles en espiral en los tubos del colector, se deberá tener en cuenta el régimen en el cual el sistema va a desarrollar su trabajo. Así, las condiciones de trabajo no serán iguales al trabajar con valores bajos de Re, que para valores altos del mismo. Por este motivo, se va a distinguir en tres zonas, que llevarán sus correlaciones vinculadas. De este modo, se trabajará de forma análoga a la descrita por *Villa (2010)*. La obtención del valor de Nu para estas correlaciones es aproximada pero se ha considerado la más acertada para cada uno de los regímenes de comportamiento del sistema.

4.4.1.- Régimen laminar.-

En primer lugar, se distingue el régimen laminar, en el cual se tomará la siguiente expresión como válida para valores inferiores al $Re_{critico}$.

$$Nu = 0.942 \cdot x^{*-0.37591} \quad (4.1)$$

Cabe destacar como dato para esta correlación la determinación de *García (2006)*, sobre el funcionamiento en valores de Re muy bajos, donde no se aprecia mejora en la transferencia de calor. Si bien, podría llegar a emporar la transferencia del mismo.

4.4.2.- Régimen turbulento.-

Se hará uso de la siguiente correlación para valores de $Re > 1200$, donde se obtendrán valores muy precisos. Tómese como ejemplo que presentará valores de error del 9.5% para $1200 < Re < 90000$ con $2.7 < Pr < 160$.

$$Nu = 0.158 \cdot (p/d)^{-0.362} \cdot (e/d)^{0.107} \cdot Re^{0.724} \cdot Pr^{0.370} \quad (4.2)$$

4.4.3.- Régimen transitorio.

Para valores de $Re_{crítico} < Re < 1200$, se considerará régimen transitorio. Para la obtención del valor de Nu en estas condiciones se realizará una interpolación de los valores obtenidos para cada una de las expresiones anteriores (a saber, laminar y turbulento). Al no conocer valores del régimen transitorio se recurre a esta interpolación, sabiendo que los valores obtenidos serán aproximados.

$$Nu(Re) = Nu_{lam}(Re_c) + \frac{Re - Re_c}{1200 - Re_c} \cdot (Nu_{turb}(1200) - Nu_{lam}(Re_c)) \quad (4.3)$$

Donde $Re_{crítico}$ será:

$$Re_c = -128.28 + 186.883 \cdot \left(\frac{p}{d}\right) \quad (4.4)$$

4.5.- Desarrollo del modelo matemático en MATLAB para muelles.-

El modelo matemático a seguir en MATLAB para el desarrollo del comportamiento del sistema con la inserción de los muelles seguirá la tónica del modelo para tubo liso, salvando algunas diferencias que a continuación son explicadas:

- Inserción de las matrices que darán definición a los muelles que serán ensayados. Para ello, se indicarán los pasos y los espesores adimensionales en dos matrices.
- Introducción de nuevos valores de parámetros de flujo, tales como el Re_c , Nu_{lam} , Nu_{turb} , Nu_{trans} y los valores condicionales que llevarán a la elección de un valor de una expresión para el cálculo del Nusselt en relación al valor de Reynolds obtenido, tal como se ha indicado en apartados anteriores.
- Finalmente, para la obtención de la iteración con el resto de variables ya existentes, se incluye una tercera variable con la que serán introducidos los valores de paso para los muelles (p/d). De este modo, se tomará una nueva dimensión en la matriz que obligará a realizar ciertos cambios a en la obtención de resultados y conclusiones sobre la introducción de los nombrados muelles.

En el anexo II se incluye el desarrollo del código MATLAB seguido para la obtención de resultados en éste método.

Se deberá destacar que el modelo ya ha sido validado y sus rectas de eficiencia son consideradas totalmente validas, con porcentajes de variación pequeños para tubo liso, por lo que se extrapola la validez del método para la inserción de muelles, y, como consecuencia, sus variaciones respecto a los resultados reales deberán ser mínimos.

En la siguiente tabla se representa la geometría de los muelles estudiados.

Muelle	d (mm)	p (mm)	e (mm)	p/d	e/d	p/e	Re crítico
M01	7	7	0,518	1	0,074	13,5	58,6
M02	7	10,5	0,518	1,5	0,074	20,3	152
M03	7	14	0,518	2	0,074	27	245,5
M04	7	21	0,518	3	0,074	40,5	432,4
M05	7	24,5	0,518	3,5	0,074	47,3	525,8
W01	7	7	0,7	1	0,1	7	58,6
W02	7	10,5	0,7	1,5	0,1	15	152
W03	7	14	0,7	2	0,1	20	245,5
W04	7	21	0,7	3	0,1	30	432,4
W05	7	24,5	0,7	3,5	0,1	35	525,8

Tabla 23: Parámetros característicos de los muelles a emplear en el modelo.

4.6.- Curvas de eficiencia normalizadas.-

En las figuras siguientes, se presentan los resultados de las curvas de eficiencia normalizadas para los muelles de ED=0,074 y 0,1. Los cálculos han sido realizados para las condiciones descritas en la tabla 3.1 (condiciones curva ef. 1er. Orden).

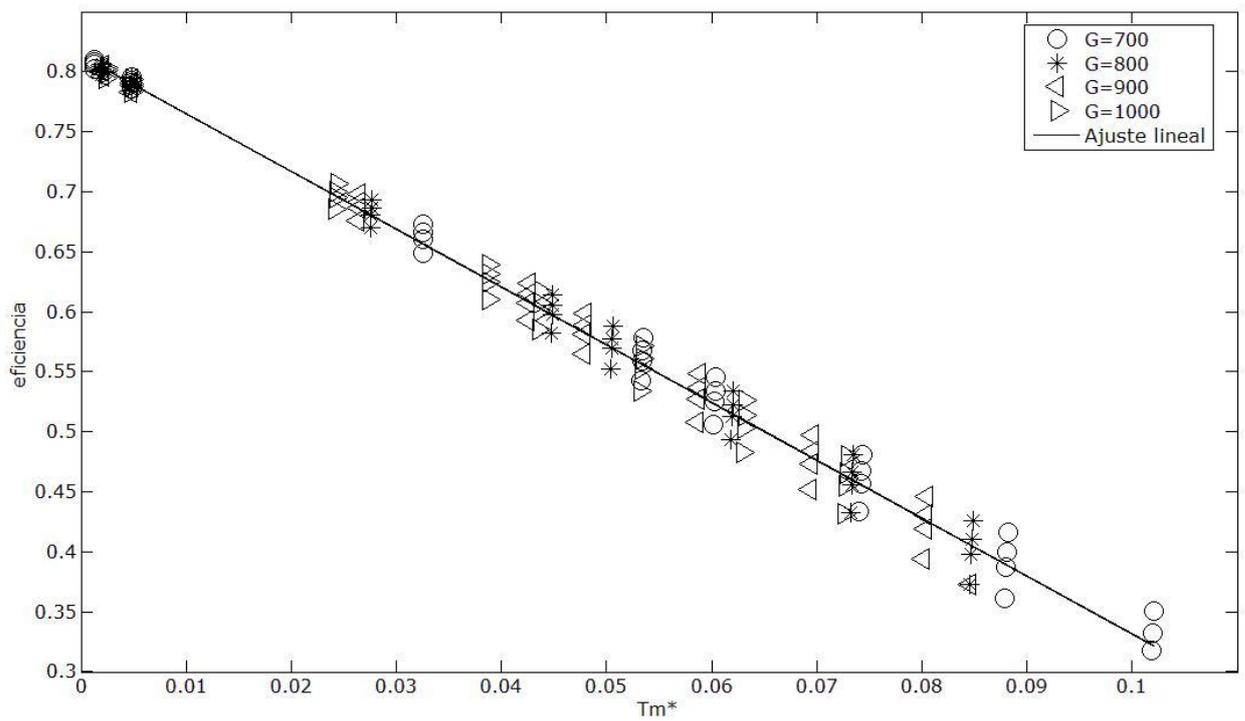


Fig. 31: Curva de eficiencia normalizada del colector para un ED de 0.074.

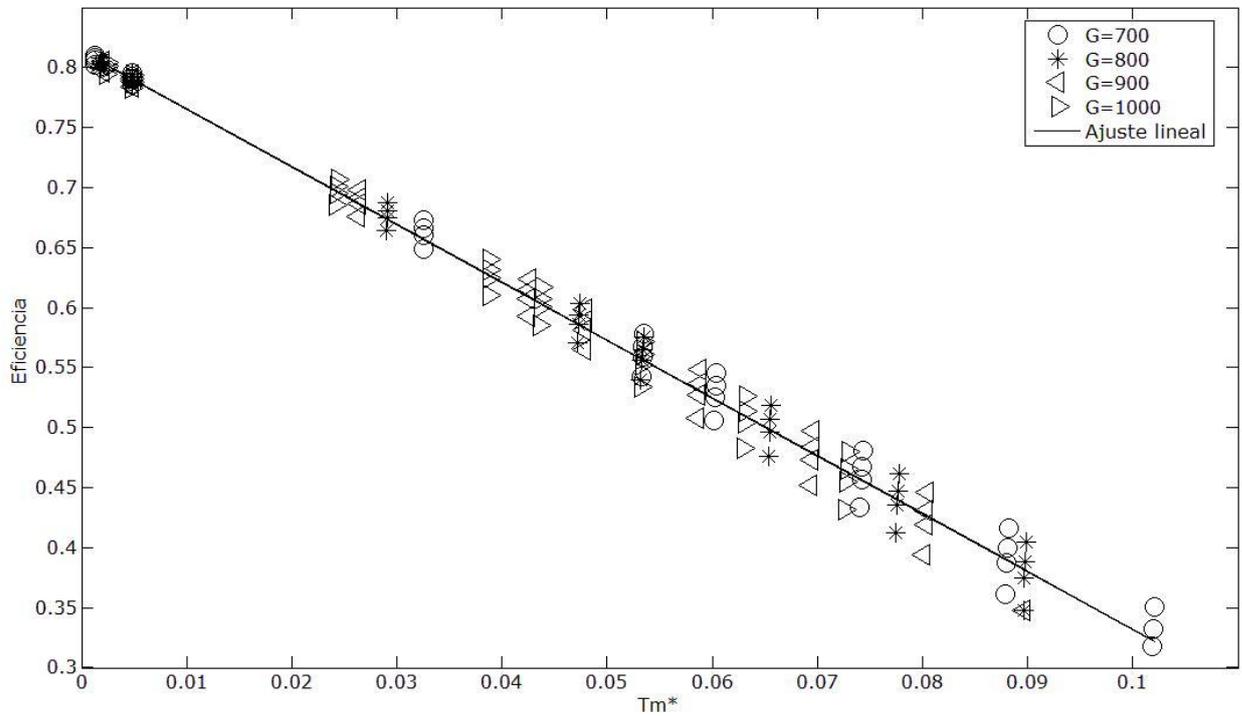


Fig. 32: Curva de eficiencia normalizada para un ED = 0.1

En la tabla siguiente se tabulan los coeficientes:

h_0, η_0 : Factor óptico (valor de eficiencia del colector para $T_m^*=0$)

h_1, a_2, a_1 : coeficientes de pérdidas térmicas del ajuste.

Muelle	Valor h_0	Valor h_1
M01	0.8133	-4.8146
M02	0.8122	-4.8050
M03	0.8113	-4.7969
M04	0.8097	-4.7791
M05	0.8086	-4.7671

Tabla 24: Valores ajuste primer orden para muelles de ED = 0.074

Muelle	Valor h_0	Valor h_1
W01	0.8136	-4.8147
W02	0.8124	-4.8069
W03	0.8117	-4.7974
W04	0.8100	-4.7799
W05	0.8091	-4.7684

Tabla 25: Valores ajuste primer orden para muelles de ED = 0.1

Se observa como el factor geométrico que más influye en la curva de eficiencia del captador es el paso del muelle. El espesor adimensional presenta una menor influencia. Todos los captadores con muelles presentan un mayor factor óptico y un menor coeficiente de pérdidas que el obtenido para el captador liso.

Se presentan las curvas para los muelles M01 y W01, el resto de las curvas serán presentadas en el anexo III.

4.7.- Estudio paramétrico.-

4.7.1.- Influencia de la velocidad del viento.-

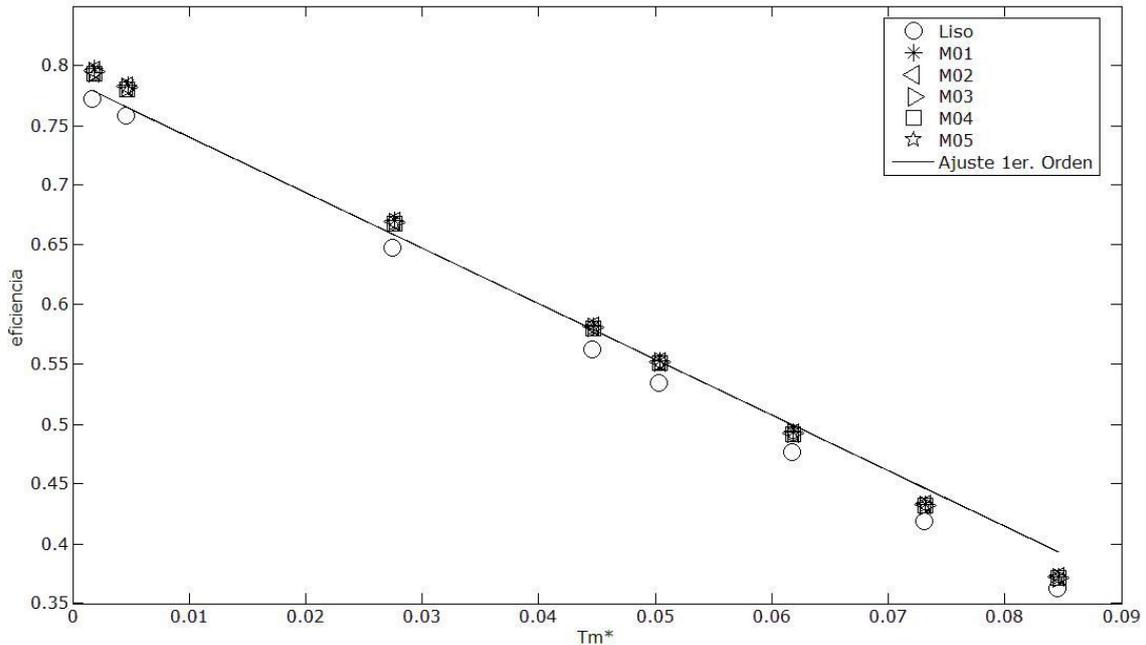


Fig. 33: Curva de eficiencia para $ED = 0.074$ y $u = 3$.

Se aprecia en todos los valores de velocidad un aumento de la eficiencia del colector, al quedar los valores de eficiencia siempre por encima de los valores del liso. De otro lado, se puede observar que para un mismo valor de T_m^* , las diferencias entre los distintos muelles y el modelo liso son muy similares para las 4 velocidades ensayadas.

Dif. máxima (%)	Dif. mínima (%)
2.52	2.31

Tabla 26: Diferencias máxima y mínima entre valores de eficiencia para $u=3$ y $ED=0.074$

Finalmente, se observa que las diferencias entre liso y muelles se acentúan de una forma mayor a menores valores de Tm^* .

No se observa una diferencia destacable de las representaciones gráficas para una misma velocidad del viento y a distintos espesores adimensionales.

4.7.2.- Influencia concentración PPG.

Las figuras siguientes muestran las curvas de eficiencia para agua y conc=60% ppg, muelle de ED=0,074. El resto de las representaciones gráficas quedarán reflejadas en el anexo III.

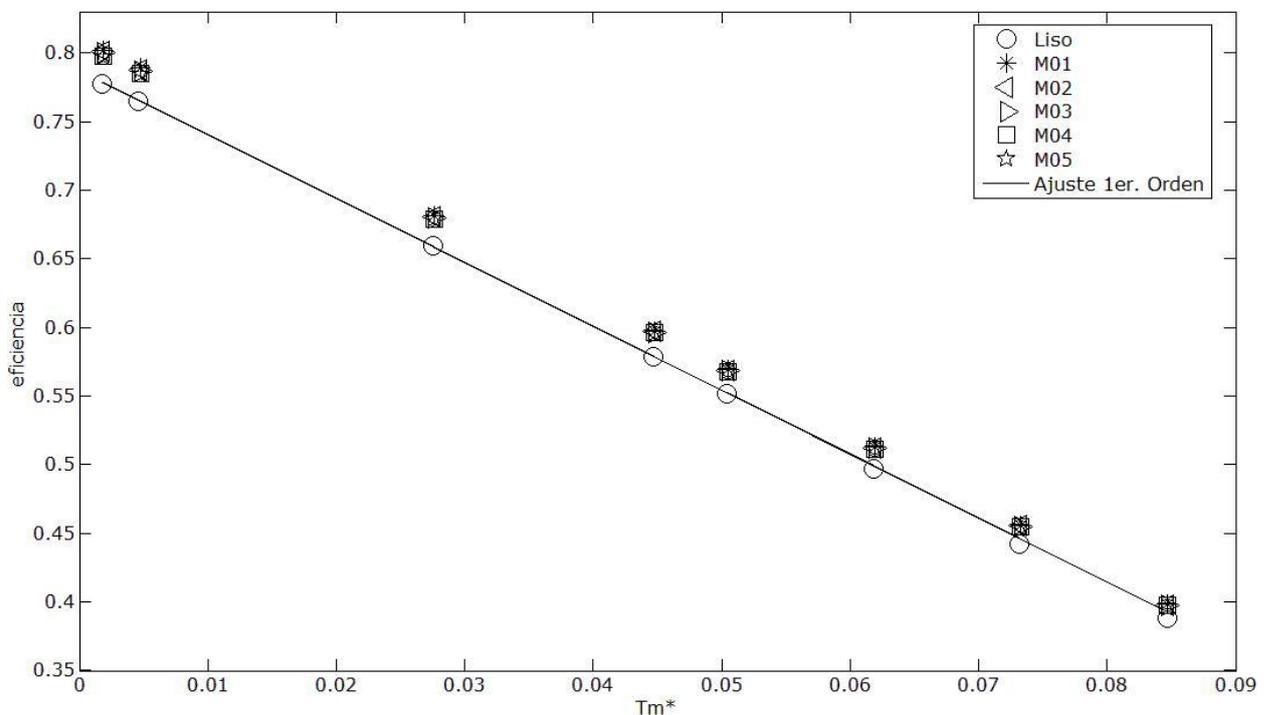


Fig. 34: Curva de eficiencia para $ED = 0.074$ y 0% PPG.

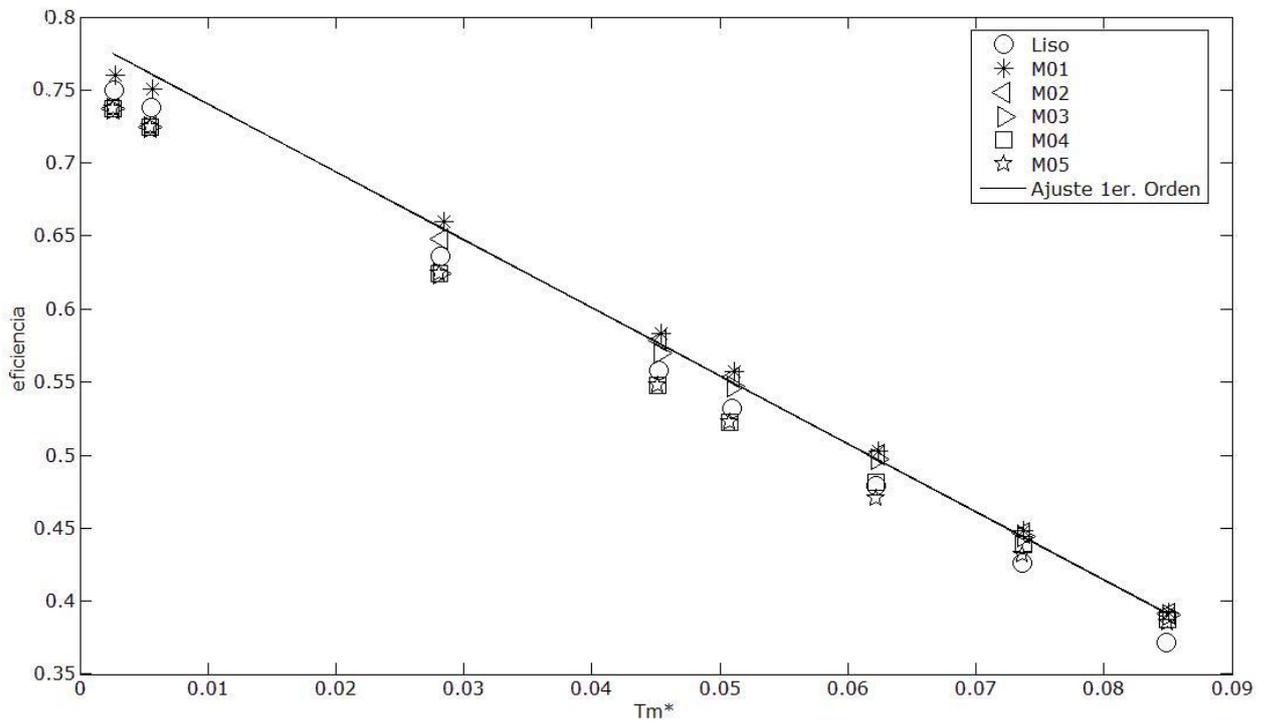


Fig. 35: Curva de eficiencia para ED = 0.074 y 60% PPG

Se puede observar que se presenta una mejoría en los valores de eficiencia respecto al liso, que, de forma análoga, se repunta para valores más bajos de Tm^* . Por otra parte, se observa que para valores de concentración superiores al 20% de Polipropileno-glicol, para estos valores más bajos de Tm^* , comienzan a alterarse los resultados y a verse las diferencias liso-muelles de una forma más difusa, entrando en una nube de puntos. También se deberá apuntar al hecho de que esta variación de los valores se incrementa conforme se aumenta la concentración, afectando de forma proporcional a valores más altos de Tm^* conforme aumenta la concentración de PPG. Este hecho se debe al aumento casi exponencial de la viscosidad que le proporciona mayores cantidades de PPG a la mezcla del fluido conductor, alterando, por ende, a los valores de Re , y como consecuencia final, a la transmisión del calor.

Se observa como a menores temperaturas, con el fluido más frío, no todos los muelles mejoran la eficiencia térmica, solo los muelles de menor paso mejoran la eficiencia.

Para concentraciones más bajas de PPG los muelles mejoran la eficiencia en un rango apreciable de Tm^* . A medida que sube la concentración de glicol,

el rango efectivo de T_m^* mejora de los muelles es más reducido. Este hecho se debe al aumento casi exponencial de la viscosidad que le proporciona mayores cantidades de PPG a la mezcla del fluido conductor, alterando, por ende, a los valores de Re , y como consecuencia final, a la transmisión del calor.

Para un gasto másico de 72 kg/m^2 , el rango de Reynolds para temperaturas adimensionales entre 0 y 0.085 vendrá dado por los valores de la tabla

Conc. PPG	Rango Re para $T_m^*=0$	Rango Re para $T_m^*=0.085$
0% glicol	800 - 986	2587 - 2700
60% glicol	73 - 114	693 - 765

Tabla 27: Rangos de valores de Re para $T_m^*=0$ y $T_m^*=0-085$

De este modo, para agua se observa que para T_m^* próximas a 0, los valores de Re superan a todos los Re_c de todos los muelles, y como consecuencia, todos los muelles mejoran de una forma equitativa. Para valores de T_m^* cercanos a 0.1 se observa que el colector se encuentra en régimen turbulento, lo que hará que las mejoras sean considerablemente menores.

4.7.3.- Estudio influencia del caudal.-

En las figuras bajo estas líneas, quedarán reflejadas las curvas para un ED de 0,074 y para caudales de 30 y $60 \text{ l/h}\cdot\text{m}^2$. Como se va haciendo a lo largo de éste capítulo, el resto de las representaciones gráficas para este espesor adimensional y para el $ED = 0.1$ quedarán representadas en el Anexo III.

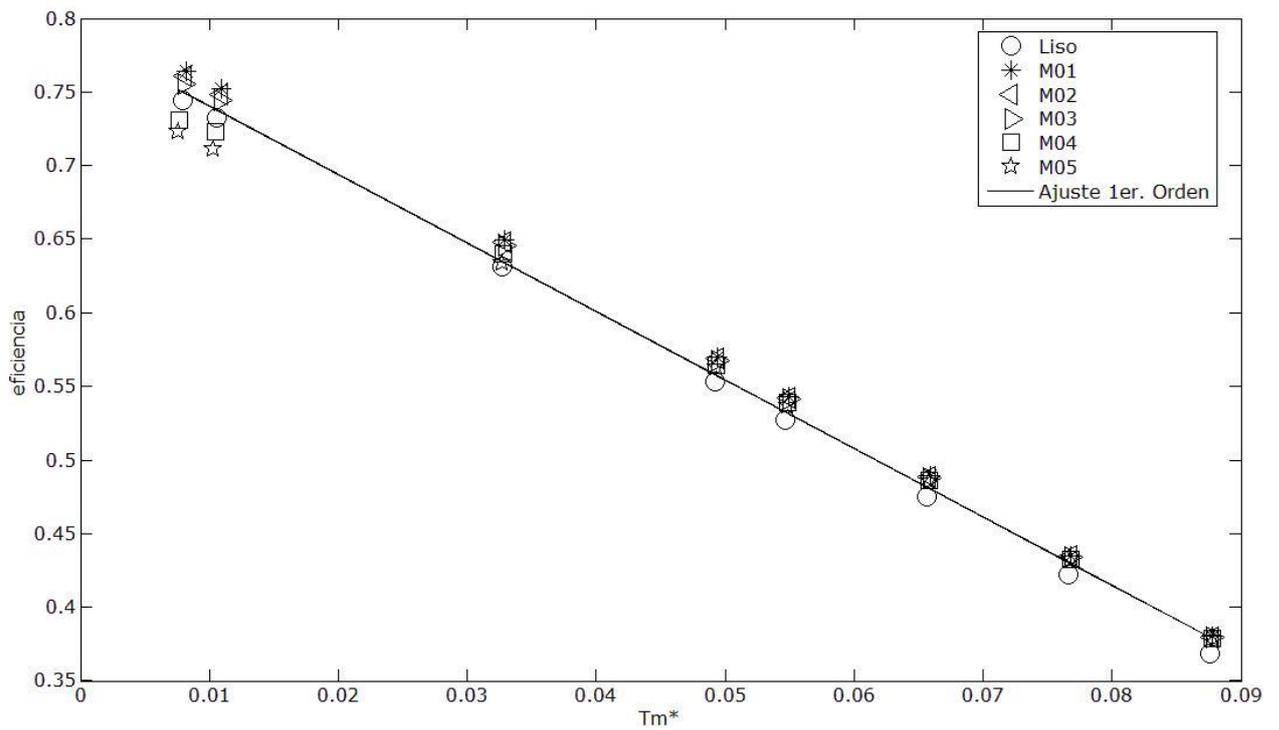


Fig. 36: Curva de eficiencia para $ED = 0.074$ y $q=30$ l/h·m²

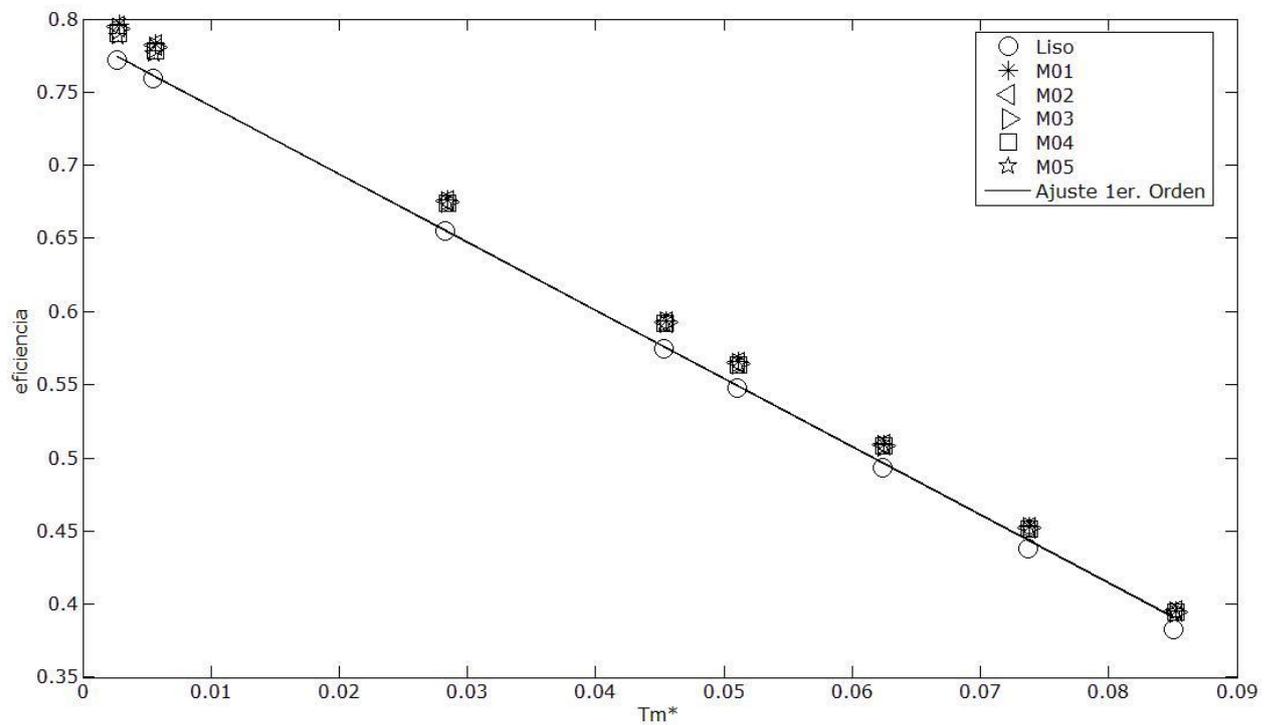


Fig. 37: Curva de eficiencia para $ED = 0.074$ y $q=60$ l/h·m²

En referencia al barrido de caudales, puede apreciarse a nivel general, que los valores de eficiencia resultan mejores para los muelles que para el modelo liso, acortándose estas diferencias conforme al aumento del caudal, y llegando finalmente para los valores de Tm^* más altos a incluso ser indiferente el uso de muelle o tubo liso. En la misma línea, se encuentran diferencias muy notables para valores de Tm^* más bajos en la representación de $q = 30$, que destaca las variaciones antes comentadas en el barrido de concentraciones.

El hecho de esta variación inicial para $q=30$ en valores de Tm^* bajos queda explicada nuevamente por el régimen. En la tabla 28 se podrán observar los rangos sobre los que se mueven los caudales representados en las figuras 36 y 37.

Caudal	Rango Re para $Tm^*=0$	Rango Re para $Tm^*=0.085$
$q = 30 \text{ l/h}\cdot\text{m}^2$	335 - 505	1078 - 1242
$q = 60 \text{ l/h}\cdot\text{m}^2$	670.9 - 854.8	2156 - 2314

Tabla 28: Rangos de valores de Re para $Tm^*=0$ y $Tm^*=0-085$

Para $q = 30 \text{ l/h}\cdot\text{m}^2$ y valores menores de Tm^* , el muelle de paso más corto (W01) es el que más mejora. Esto se debe a que ha superado el valor de Re_c para este muelle y las mejoras son más pronunciadas para éste aunque a excepción de los muelles W04 y W05 todos han superado este valor crítico. Es por éste hecho que se observan unas mejoras tan pronunciadas.

Sin embargo, para $q = 60 \text{ l/h}\cdot\text{m}^2$, las mejoras son equitativas al haber pasado todos el valor de Re_c para valores de Tm^* más bajos, siendo el comportamiento análogo para todos los muelles a valores de Tm^* más altos en ambos caudales. Esta similitud en eficiencia para caudales altos y valores de Tm^* altos se plantea también por una cuestión de flujo antagónica al caso de líneas anteriores. Se deberá matizar en los valores de flujo para estos casos, pero puede darse el caso de Régimen turbulento que haga que las diferencias entre los valores obtenidos para los diversos muelles sean mínimas respecto al tubo liso.

4.7.4.- Estudio paramétrico del comportamiento de los muelles para un barrido de variables características.-

A continuación se resumen los datos más concluyentes observados en las representaciones gráficas para cada muelle de cada paso y espesor adimensional, los cuales han sido sometidos a un barrido de cada una de las variables características y observado su evolución respecto a los demás muelles y entre ellos mismos.

Como primera conclusión se establece que las diferencias entre muelles de distinto espesor adimensional son prácticamente mínimas, por lo que se centrarán las conclusiones en los muelles de ED de valor 0.074.

Para el caso de la velocidad del viento, influye por igual en todos los muelles, observándose que a una mayor velocidad del viento se tendrá una menor eficiencia. Esto se debe a que una mayor velocidad dificultará las operaciones de transmisión de calor y por ende, causará una disminución de la eficiencia.

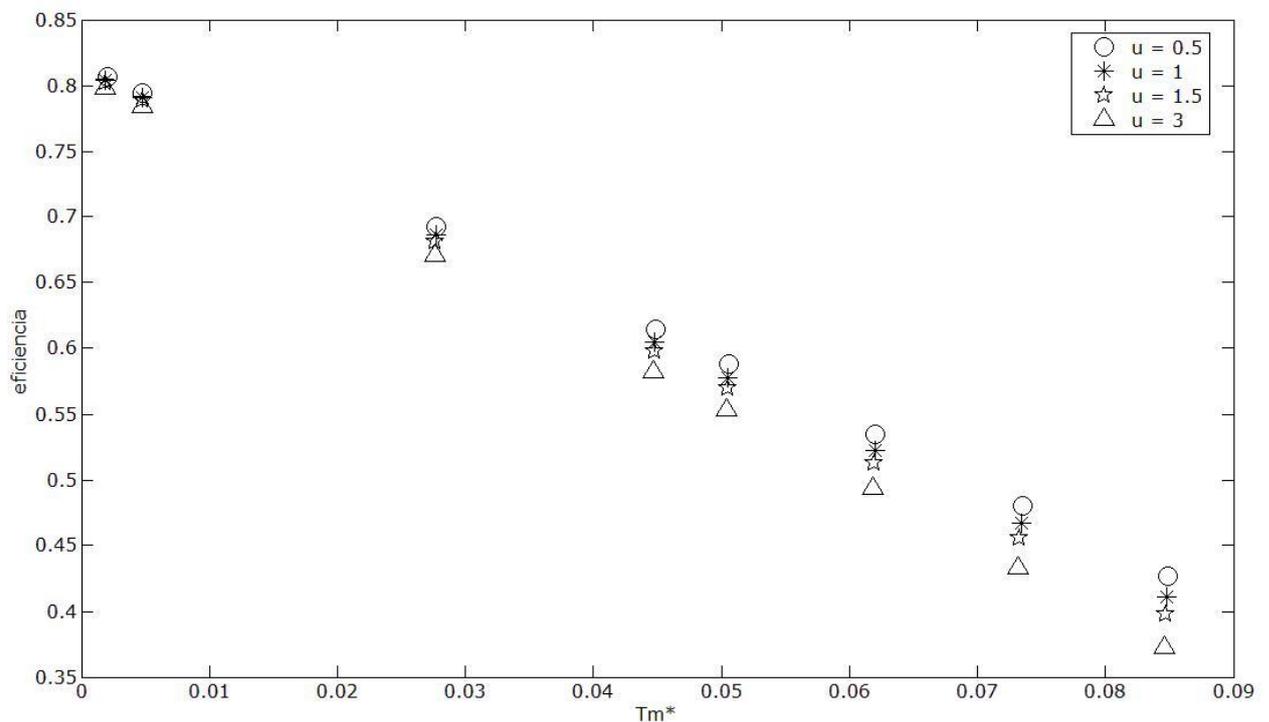


Fig. 38: Influencia de la velocidad del viento para muelle M01.

El caudal afecta en mayor, medida, a los muelles de mayor paso. Un menor caudal implica menor Re y afecta, por tanto al comportamiento de los captadores con muelles de menor paso. Esto se debe a que el captador puede estar operando por debajo de su Re crítico.

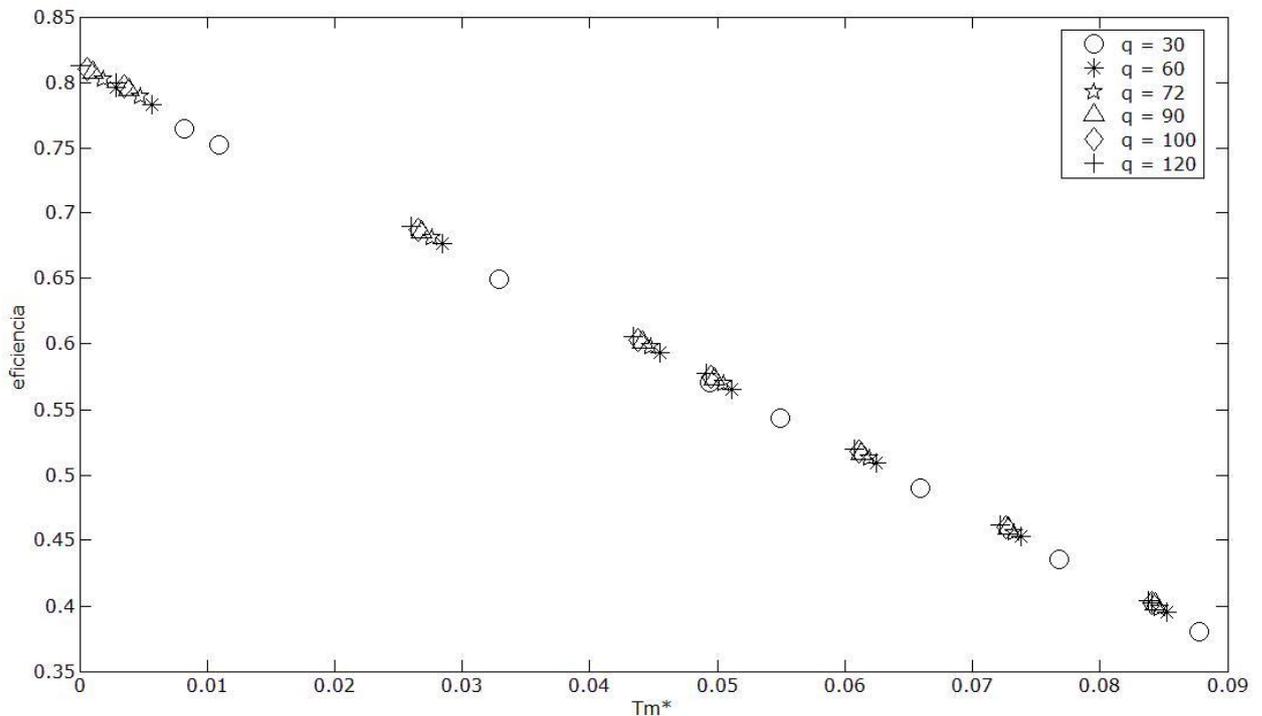


Fig. 39: Influencia del barrido de caudales para M01.

De forma análoga a lo ocurrido con los caudales se puede concluir con los valores de concentración. Para los muelles de menor paso las mejoras pueden no ser considerables, atendiendo a los valores de Re obtenidos para estos valores de Tm^* . Por otra parte, a mayores valores de concentración, el comportamiento de los muelles de mayor paso se verá afectado, debido al aumento de la viscosidad del fluido conductor, y como consecuencia a la eficiencia del colector.

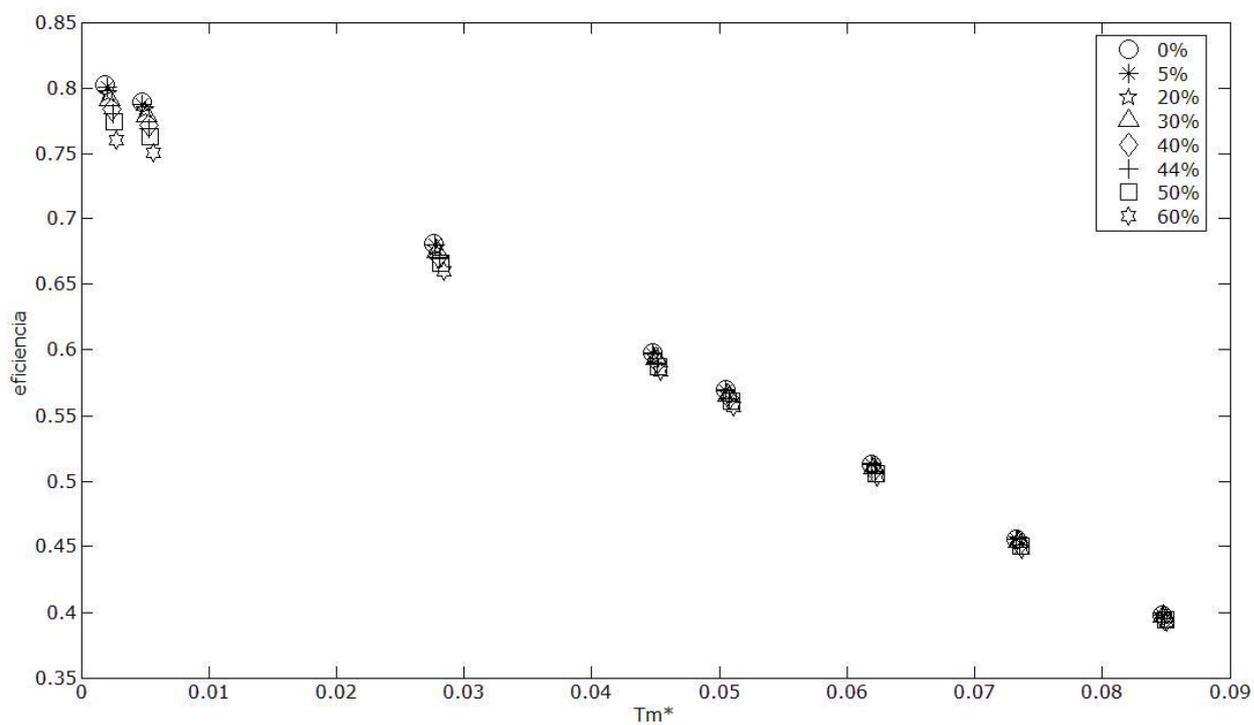


Fig. 40: Influencia del barrido de concentraciones para M01.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES FINALES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1.1.- Conclusiones finales.-

Se han obtenido modelos matemáticos para simular el comportamiento del colector con tubos lisos y con muelles insertados, insertando correlaciones propias que se asimilan en gran medida al comportamiento real de los mismos.

Se ha realizado un código en MATLAB para modelar ambos tipos de colector, a saber tubo liso y muelles insertados, consiguiendo con éxito la simulación de un colector solar plano de tipo parrilla.

Se ha conseguido predecir la eficiencia del colector para varios valores de irradiancia, velocidad del viento, concentración de polipropileno-glicol, gasto másico y distintas temperaturas de entrada, entre otras variables como paso adimensional de muelle y espesor adimensional.

A través de los resultados obtenidos, se consigue determinar que geometrías se deberán usar en la instalación de colectores solares planos que el Departamento de ingeniería térmica y de fluidos de la UPCT dispone, consiguiendo así una orientación en los ensayos experimentales a realizar.

Se han determinado como conclusiones finales las siguientes:

Para el modelo del captador realizado con **tubo liso**, se observa que a una mayor *velocidad del viento* se tienen menores valores de eficiencia del colector.

Por otro lado, para variaciones de *irradiancia* y *caudal*, no se fija una tendencia concreta en cuanto a un repunte o disminución de la eficiencia, observándose variaciones para distintos valores.

Para un mayor valor de *concentración* se observan disminuciones de la eficiencia del colector.

Para el modelo realizado con **muelles insertados**, se puede concluir, en primera instancia, que el valor de espesor adimensional no será un factor influyente en la eficiencia del colector.

Se ha comprobado que los muelles con valores de paso más cortos son más independientes de las variaciones de las variables de operación, frente a los muelles de valores de paso más grandes que dependen más de éstas mismas variaciones.

De un lado, las variaciones de velocidad del viento, no supondrán una mejora para la eficiencia del colector al insertar muelles, no siendo destacable una geometría concreta como la óptima en base a éstas variaciones.

Para las variaciones de caudal se consideran variaciones para valores de Tm^* menores debido a cuestiones de flujo (valores de Re no están todos en un mismo régimen). Algunos muelles superan valores de Re_c . Caso análogo se ha observado para las concentraciones.

Finalmente, las variaciones de concentración supondrán una disminución de la eficiencia como ha sido estipulado también en el modelo con tubo liso.

5.1.2.- Trabajos futuros.-

Se contemplan como posibles trabajos futuros para dar continuidad a las investigaciones realizadas en este proyecto fin de carrera, entre otras:

- Estudio de la pérdida de carga generada por el funcionamiento del fluido conductor dentro de los tubos del panel absorbedor. Se pretende de éste modo evaluar globalmente las prestaciones termohidráulicas del captador mejorado. Se plantea así un estudio del incremento de la transmisión del calor frente a un incremento de pérdida de carga en el colector.
- Estudio de captadores de tipo serpentín. Se ha observado que al pasar por un único tubo, los caudales deberán ser mayores y se generará por ende, un régimen turbulento que se considera de interés ser estudiado. El fin que se persigue es conocer la posibilidad de extrapolar la inserción de muelles en espiral en los tubos de los colectores de tipo serpentín. Esta línea ya ha sido comenzada por *Villa* en 2010, aunque se considera que debería hacerse un estudio pormenorizado haciendo uso del software MATLAB.

**ANEXO I:
CÓDIGO MATLAB PARA EL
DESARROLLO DEL MODELO
MATEMÁTICO CON TUBO LISO.**

```

clear
%DATOS VARIOS
u=0.5; % velocidad del viento (norma UNE-EN 12975-2, m/s)
boltzmann=5.67e-08; %Constante de Stefan-Boltzmann
g_t=9.81; %Cte gravedad (m/s^2)
pi=3.1415926;
conc=0 %glicol

Long=[0:0.01:1.83]
casos=length(Long)-1

%DATOS INSTALACIÓN
A_a=2; %Area del colector
beta=45; % Angulo inclinación del plano respecto a la horizontal (°)
beta_rad=(beta*2*pi)/360;% pasamos el angulo a radianes
N=1; %Numero de vidrios del colector
N_t=9; % Número de tubos del panel absorbedor
W=1.105; %Anchura total placa absorbedora (m)
w=W/N_t; %Anchura placa absorbedora por tubo (m)
D_i=0.007; %Diametro interior de los tubos (m)
D_e=0.008; %Diametro exterior de los tubos (m)
b=0.04; %Espesor captador (m)
delta_abs=0.0005; %Espesor de la placa del absorbedor (m)
delta_aisl=0.025; %Espesor del aislante del captador (m)
delta_tubo=0.0005; %Espesor del tubo (m)
g=0.0035; %Amplitud de la soldadura (m)
L=1.83; %Longitud tuberias%
tau_g=0.95; %Transmitancia de la cubierta transparente
alfa_abs=0.945; %Absortancia del absorbedor
e_g=0.88; %Emitancia cubierta transparente
e_abs=0.05; %Emitancia del absorbedor (varía entre rangos)
g=0.0035; %Ancho zona de contacto entre tubo y aleta (m)

%DATOS Tª Y CONDUCTIVIDADES TERMICAS
G=800; %Irradiación solar incidente global (W/m^2)
T_finn=90+273.15; %Tª entrada fluido (K)
T_a=20+273.15; %Temperatura ambiente (norma, K)
T_abs=75.9+273.15; %Temperatura del absorbedor (K)?????
k_aisl=0.045; %Cond. térmica del aislante (W/mK)
k_abs=209.3; %Conductividad térmica del absorbedor (W/mK)
g_d=6.6; %Conductividad de la soldadura (W/mK) Podemos tocarlo
g_d=3600;
k_tubo=372; %Cte conductividad del tubo (W/mK)

%DATOS FLUJO
q_min=72; %gasto másico mínimo total (Kg/h*m^2)
f_masicomin=(q_min*A_a)/N_t/3600; %Flujo másico mínimo por tubo (Kg/s)

%BUCLE PARA EL CÁLCULO DE PÉRDIDAS
h_w=5.7+(3.8*u); % Coef. transf. q. debido al viento en la cubierta (W7m^2K)
C=520*(1-0.000051*(beta_rad^2)); %parametro de la ecuacion de perdidas de
klein
f=((9/h_w)-(30/h_w^2))*(T_a/316.9)*(1+0.091*N); %Relación entre la
resistencia térmica externa e interna
U_be=k_aisl/delta_aisl; %Coef. perdidas del fondo y laterales del colector

```

```

S=G*(tau_g*alfa_abs); %Energía solar absorbida por el colector (W/m^2)

%BUCLE PARAMETROS DE FLUJO

T_finn=[17.5 20 40 55 60 70 80 90]+273.15
k=1
for k=1:size(T_finn,2)
T_fin(k,1)=T_finn(k)
j=2
for i=1:casos
T_abs(1)=30+273.14
T_abs(2)=300
while abs((T_abs(j)-T_abs(j-1)))>0.01
U_t1(k,i)=(N/((C/T_abs(j))*((T_abs(j)-T_a)/(N+f))^0.252)+(1/h_w))^-1;

U_t2(k,i)=boltzmann*(T_abs(j)+T_a)*(T_abs(j)^2+T_a^2);
U_t3(k,i)=(e_abs+(0.0425*N*(1-e_abs)))^-1+(((2*N)+f-1)/e_g)-N;
U_t(k,i)=U_t1(k,i)+(U_t2(k,i)/U_t3(k,i));
U_l(k,i)=U_be+U_t(k,i); %Coef. global de pérdidas de calor del captador con
Tª uniforme de absorbedor

x(k,i)=Long(i)+(Long(i+1)-Long(i))/2;
A(k,i)=W*(Long(i+1)-Long(i))/9;

%%PROPIEDADES FÍSICAS MEZCLA AGUA-GLICOL
BB(k,i)=71.639163222-0.66981698459*T_fin(k,i)+0.0019150513174*T_fin(k,i)^2-
0.0000018587687783*T_fin(k,i)^3;
CC(k,i)=0.27019804611-
0.0012299975866*T_fin(k,i)+0.0000015045427918*T_fin(k,i)^2;
mu(k,i)=exp(BB(k,i)+CC(k,i)*conc); % Viscosidad fluido conductor (Pa*s)

DD(k,i)=3.8649883866-0.023691954902*conc-0.00011278222908*conc^2;
EE(k,i)=0.001023655712+0.000056633876714*conc;
c_f(k,i)=(DD(k,i)+EE(k,i)*T_fin(k,i)).*1000; % Cp fluido conductor (j/kgK)

FF(k,i)=875.54696219+2.151387542*conc;
GG(k,i)=1.1191046068-0.0007599907262*conc-0.000049236799989*conc^2;
HH(k,i)=-0.002377960199-0.0000091377252136*conc+0.00000010872237562*conc^2;
rof(k,i)=FF(k,i)+GG(k,i)*T_fin(k,i)+HH(k,i)*T_fin(k,i)^2; %Densidad fluido
conductor (kg/m^3)

II(k,i)=-0.78595253278+0.015561899561*conc-0.000048933521576*conc^2;
JJ(k,i)=0.0076866167254-0.0001155974176*conc+0.0000003660336083*conc^2;
KK(k,i)=-0.0000099976810237+0.00000014560615474*conc-4.5879383578E-10*conc^2;
k_f(k,i)=II(k,i)+JJ(k,i)*T_fin(k,i)+KK(k,i)*T_fin(k,i)^2; %Cond térmica
fluido

Pr(k,i)=(mu(k,i)*c_f(k,i))/k_f(k,i); %Nº Prandtl
Re(k,i)=(4*f_masicomin)/(pi*D_i*mu(k,i)); %Valor Nº Reynolds para caudal
mínimo establecido
Gz(k,i)=(pi/4)*(x(k,i)/(D_i*Re(k,i)*Pr(k,i)))^-1; %Valores Nº Graetz
dependerán de la posición x del fluido en el tubo

```

```

Nu_lam(k,i)=4.36*(1+(Gz(k,i)/29.6)^2)^(1/6)*(1+((Gz(k,i)/19.04)/((1+(Pr(k,i)/0.0207)^(2/3))^(1/2)*(1+(Gz(k,i)/29.6)^2)^(2/3))))^(3/2)); %Valor N° Nusselt establecido
F_PED(k,i)=0.25*(1.82*LOG10(Re(k,i))-1.64)^-2;
Nu_tur(k,i)=(Re(k,i)-1000)*Pr(k,i)*F_PED(k,i)/2/(1.07+12.7.*(Pr(k,i)^(2/3)-1)*(F_PED(k,i)/2)^0.5);

if Re(k,i)<2300
    Nu(k,i)=Nu_lam(k,i);
else
    Nu(k,i)=Nu_lam(k,i)*((4000-Re(k,i))/1700)+Nu_tur(k,i)*((Re(k,i)-2300)/1700);
end

h_fi(k,i)=Nu(k,i)*k_f(k,i)/D_i; %Coeficiente de transferencia de calor del fluido para qmin (W/m 2K)

%BUCLE EXPRESIONES EISENMANN
mu_d(k,i)=1/2*((pi*D_i)-g)*sqrt((Nu(k,i)*k_f(k,i))/(D_i*k_tubo*delta_tubo));
%Parametro tipo Biot
nu_d(k,i)=tanh(mu_d(k,i))/mu_d(k,i); %Eficiencia de aleta del tubo
s_inf(k,i)=((pi*nu_d(k,i))/2)+(((1+nu_d(k,i))*g)/(2*D_i)); %Factor de forma
c_e(k,i)=(g_d*g)/(2*k_f(k,i)*Nu(k,i)); %Parámetro de conductancia en el contacto entre aleta y tubo
k_gf(k,i)=(1/c_e(k,i)+1/s_inf(k,i))^-1*((2*k_f(k,i)*Nu(k,i))/(pi*D_i));
%Coef. transm. q entre fluido y zona de contacto (W/m 2K)

%CALCULOS F, F' Y F_r
m(k,i)=sqrt(U_l(k,i)/(k_abs*delta_abs)); %Parametro para el calculo de F
F(k,i)=(tanh((m(k,i)/2)*(w-g)))/((m(k,i)/2)*(w-g)); %Eisenmann
F_primae(k,i)=(w*((1/((w-g)*F(k,i)+g))+U_l(k,i)/(k_gf(k,i)*pi*D_i)))^-1;
%Eisenmann
F_primah(k,i)=(1/U_l(k,i))/(w*(1/(U_l(k,i)*(D_e+(w-D_e)*F(k,i))))+(1/g_d)+1/(pi*D_i*h_fi(k,i)))); %Hobbi
F_r(k,i)=((f_masicomin*c_f(k,i))/(A(k,i)*U_l(k,i)))*(1-exp(-(F_primae(k,i)*U_l(k,i)*A(k,i))/(f_masicomin*c_f(k,i)))); %Eisenmann

%OBTENCIÓN RENDIMIENTO, TEMPERATURAS, ETC

Q_util(k,i)=A(k,i)*F_r(k,i)*(S-(U_l(k,i)*(T_fin(k,i)-T_a)));
T_abs_cal(k,i)=T_fin(k,i)+(Q_util(k,i)/(A(k,i)*U_l(k,i)*F_r(k,i)))*(1-F_r(k,i)); %Temperatura absoluta del absorbedor para (K)
T_fout(k,i)=T_fin(k,i)+(Q_util(k,i)/(f_masicomin*c_f(k,i))); %Tªsalida
j=j+1
T_abs(j)=T_abs_cal(k,i);
end

j=2
T_fin(k,i+1)=T_fout(k,i);
end
end

for k=1:size(T_finn,2)

```

```
eficiencia(k)=sum(Q_util(k,:))/(W*L/9*G); %Eficiencia de colector con caudal
mínimo establecido
T_out(k)=T_fout(k,casos);
T_absorbedor(k)=mean(T_abs_cal(k));
t_m(k)=(T_finn(k)+T_fout(k,casos))/2; %Temperatura media del fluido de
transferencia de calor (K)
T_m(k)=(t_m(k)-T_a)/G; %(Tm*) T adimensional Diferencia de Ta absoluta
reducida (m2K/W)
EFI_SOL_1(k)=0.787-4.653.*T_m(k);
EFI_SOL_2(k)=0.799-3.4.*T_m(k)-0.026.*G.*T_m(k)^2;
end

DATOS=[T_finn' T_out' T_absorbedor' T_m' eficiencia' EFI_SOL_1' EFI_SOL_2']

P=polyfit(DATOS(:,4),DATOS(:,5),1)
A=polyfit(DATOS(:,4),DATOS(:,5),2)

EFI_CAL_1=P(2)+P(1).*DATOS(:,4);
EFI_CAL_2=A(3)+A(2).*DATOS(:,4)+(A(1)/G).*DATOS(:,4).^2;

figure(1)
plot(T_m,eficiencia,'ko',T_m,EFI_SOL_1,'k-',T_m,EFI_SOL_2,'b-')

figure(2)
plot(T_m,eficiencia,'ko',T_m,EFI_CAL_1,'r-',T_m,EFI_CAL_2,'g-')
```


**ANEXO II:
DESARROLLO DEL CÓDIGO
MATLAB PARA EL MODELO
MATEMÁTICO CON MUELLES
INSERTADOS.**

```

clear
%DATOS VARIOS
PD=[1.0 1.5 2 3 3.5] %Paso adimensional muelle
ED=[0.074 0.074 0.074 0.074 0.074] %Espesor adimensional
u=1.5; % velocidad del viento (norma UNE-EN 12975-2, m/s)
boltzmann=5.67e-08; %Constante de Stefan-Boltzmann
g_t=9.81; %Cte gravedad (m/s^2)
pi=3.1415926;
conc=60 %glicol
Long=[0:0.01:1.83]
casos=length(Long)-1

%DATOS INSTALACIÓN
A_a=2; %Area del colector
beta=45; % Angulo inclinación del plano respecto a la horizontal (°)
beta_rad=(beta*2*pi)/360;% pasamos el angulo a radianes
N=1; %Numero de vidrios del colector
N_t=9; % Número de tubos del panel absorbedor
W=1.105; %Anchura total placa absorbedora (m)
w=W/N_t; %Anchura placa absorbedora por tubo (m)
D_i=0.007; %Diametro interior de los tubos (m)
D_e=0.008; %Diametro exterior de los tubos (m)
b=0.04; %Espesor captador (m)
delta_abs=0.0005; %Espesor de la placa del absorbedor (m)
delta_aisl=0.025; %Espesor del aislante del captador (m)
delta_tubo=0.0005; %Espesor del tubo (m)
g=0.0035; %Amplitud de la soldadura (m)
L=1.83; %Longitud tuberias%
tau_g=0.95; %Transmitancia de la cubierta transparente
alfa_abs=0.945; %Absortancia del absorbedor
e_g=0.88; %Emitancia cubierta transparente
e_abs=0.05; %Emitancia del absorbedor (varía entre rangos)
g=0.0035; %Ancho zona de contacto entre tubo y aleta (m)

%DATOS Tª Y CONDUCTIVIDADES TERMICAS
G=850; %Irradiación solar incidente global (W/m^2)
T_a=20+273.15; %Temperatura ambiente (norma, K)
k_aisl=0.045; %Cond. térmica del aislante (W/mK)
k_abs=209.3; %Conductividad térmica del absorbedor (W/mK)
g_d=6.6; %Conductividad de la soldadura (W/mK) Podemos tocarlo
g_d=3600;
k_tubo=372; %Cte conductividad del tubo (W/mK)

%DATOS FLUJO
q_min=72; %gasto másico mínimo total (Kg/h*m^2)
f_masicomin=(q_min*A_a)/N_t/3600; %Flujo másico mínimo por tubo (Kg/s)

%BUCLE PARA EL CÁLCULO DE PÉRDIDAS
h_w=5.7+(3.8*u); % Coef. transf. q. debido al viento en la cubierta (W/m^2K)
C=520*(1-0.000051*(beta_rad^2)); %parametro de la ecuacion de perdidas de
klein
f=((9/h_w)-(30/h_w^2))*(T_a/316.9)*(1+0.091*N); %Relación entre la
resistencia térmica externa e interna
U_be=k_aisl/delta_aisl; %Coef. perdidas del fondo y laterales del colector
S=G*(tau_g*alfa_abs); %Energía solar absorbida por el colector (W/m^2)

%BUCLE PARAMETROS DE FLUJO

```

```

T_finn=[17.5 20 40 55 60 70 80 90]+273.15
Re_c=-128.28+186.883.*PD; %%Reynolds critico transición muelles (AGUSTIN)
n=1
for n=1:size(PD,2)
k=1
for k=1:size(T_finn,2)
T_fin(k,1,n)=T_finn(k)
j=2
for i=1:casos
T_abs(1)=30+273.14
T_abs(2)=300
while abs((T_abs(j)-T_abs(j-1)))>0.01
U_t1(k,i,n)=(N/((C/T_abs(j))*((T_abs(j)-T_a)/(N+f))^0.252)+(1/h_w))^-1;
U_t2(k,i,n)=boltzmann*(T_abs(j)+T_a)*(T_abs(j)^2+T_a^2);
U_t3(k,i,n)=(e_abs+(0.0425*N*(1-e_abs)))^-1+(((2*N)+f-1)/e_g)-N;
U_t(k,i,n)=U_t1(k,i,n)+(U_t2(k,i,n)/U_t3(k,i,n));
U_l(k,i,n)=U_be+U_t(k,i,n); %%Coef. global de pérdidas de calor del captador
con Tª uniforme de absorbedor

x(k,i,n)=Long(i)+(Long(i+1)-Long(i))/2;
A(k,i,n)=W*(Long(i+1)-Long(i))/9;

%%PROPIEDADES GLICOL
BB(k,i,n)=71.639163222-
0.66981698459*T_fin(k,i,n)+0.0019150513174*T_fin(k,i,n)^2-
0.0000018587687783*T_fin(k,i,n)^3;
CC(k,i,n)=0.27019804611-
0.0012299975866*T_fin(k,i,n)+0.0000015045427918*T_fin(k,i,n)^2;
mu(k,i,n)=exp(BB(k,i,n)+CC(k,i,n)*conc); % Viscosidad fluido conductor (Pa*s)

DD(k,i,n)=3.8649883866-0.023691954902*conc-0.00011278222908*conc^2;
EE(k,i,n)=0.001023655712+0.000056633876714*conc;
c_f(k,i,n)=(DD(k,i,n)+EE(k,i,n)*T_fin(k,i,n)).*1000; %% Cp fluido conductor
(j/kgK)

FF(k,i,n)=875.54696219+2.151387542*conc;
GG(k,i,n)=1.1191046068-0.0007599907262*conc-0.000049236799989*conc^2;
HH(k,i,n)=-0.002377960199-0.0000091377252136*conc+0.00000010872237562*conc^2;
rof(k,i,n)=FF(k,i,n)+GG(k,i,n)*T_fin(k,i,n)+HH(k,i,n)*T_fin(k,i,n)^2; %Densida
d fluido conductor (kg/m^3)

II(k,i,n)=-0.78595253278+0.015561899561*conc-0.000048933521576*conc^2;
JJ(k,i,n)=0.0076866167254-0.0001155974176*conc+0.0000003660336083*conc^2;
KK(k,i,n)=-0.0000099976810237+0.00000014560615474*conc-4.5879383578E-
10*conc^2;
k_f(k,i,n)=II(k,i,n)+JJ(k,i,n)*T_fin(k,i,n)+KK(k,i,n)*T_fin(k,i,n)^2; %%Cond
térmica fluido

Pr(k,i,n)=(mu(k,i,n)*c_f(k,i,n))/k_f(k,i,n); %Nº Prandtl
Re(k,i,n)=(4*f_masicomín)/(pi*D_i*mu(k,i,n)); %Valor Nº Reynolds para caudal
mínimo establecido
Gz(k,i,n)=(pi/4)*(x(k,i,n)/(D_i*Re(k,i,n)*Pr(k,i,n)))^-1; %Valores Nº Graetz
dependerán de la posición x del fluido en el tubo
Gz_lim(k,i,n)=(pi/4)*(x(k,i,n)/(D_i*Re_c(n)*Pr(k,i,n)))^-1; %Valores Nº
Graetz para Reynolds critico
Nu_lam_lim(k,i,n)=0.9242*(pi/(4*Gz_lim(k,i,n)))^-0.37591; %%Nusselt laminar
para Reynolds critico

```

```

Nu_lam(k,i,n)=0.9242*(pi/(4*Gz(k,i,n)))^-0.37591; %%Nusselt laminar muelles
(AGUSTIN)
Nu_tur(k,i,n)=0.158*PD(n)^-0.362*ED(n)^0.107*Re(k,i,n)^0.724*Pr(k,i,n)^0.370;
%%Nusselt turbulento muelles (AGUSTIN);
Nu_tur_lim(k,i,n)=0.158*PD(n)^-
0.362*ED(n)^0.107*1200^0.724*Pr(k,i,n)^0.370;%%Nusselt turbulento para
Reynolds 1200
Nu_tra(k,i,n)=Nu_lam_lim(k,i,n)+((Re(k,i,n)-Re_c(n))/(1200-
Re_c(n)))*(Nu_tur_lim(k,i,n)-Nu_lam_lim(k,i,n)); %%Nusselt transicion
(AGUSTIN)

if Re(k,i,n)<Re_c(n)
    Nu(k,i,n)=Nu_lam(k,i,n);
elseif Re(k,i,n)>Re_c(n) & Re(k,i,n)<1200
    Nu(k,i,n)=Nu_tra(k,i,n);
else
    Nu(k,i,n)=Nu_tur(k,i,n);
end
h_fi(k,i,n)=Nu(k,i,n)*k_f(k,i,n)/D_i; %%Coeficiente de transferencia de calor
del fluido para qmin (W/m 2K)

%BUCLE EXPRESIONES EISENMANN
mu_d(k,i,n)=1/2*((pi*D_i)-
g)*sqrt((Nu(k,i,n)*k_f(k,i,n))/(D_i*k_tubo*delta_tubo)); %%Parametro tipo Biot
nu_d(k,i,n)=tanh(mu_d(k,i,n))/mu_d(k,i,n); %%Eficiencia de aleta del tubo
s_inf(k,i,n)=((pi*nu_d(k,i,n))/2)+(((1+nu_d(k,i,n))*g)/(2*D_i)); %%Factor de
forma
c_e(k,i,n)=(g_d*g)/(2*k_f(k,i,n)*Nu(k,i,n)); %%Parámetro de conductancia en el
contacto entre aleta y tubo
k_gf(k,i,n)=(1/c_e(k,i,n)+1/s_inf(k,i,n))^-
1*((2*k_f(k,i,n)*Nu(k,i,n))/(pi*D_i)); %%Coef. transm. q entre fluido y zona
de contacto (W/m 2K)

%CALCULOS F, F' Y F_r
m(k,i,n)=sqrt(U_l(k,i,n)/(k_abs*delta_abs)); %%Parametro para el calculo de F
%F(k,i,n)=(tanh(m(k,i,n)*(w-D_e)/2))/(m(k,i,n)*(w-D_e)/2); %%Hobbi
F(k,i,n)=(tanh((m(k,i,n)/2)*(w-g)))/((m(k,i,n)/2)*(w-g)); %%Eisenmann
F_primae(k,i,n)=(w*((1/((w-
g)*F(k,i,n)+g)))+(U_l(k,i,n)/(k_gf(k,i,n)*pi*D_i))))^-1; %%Eisenmann
F_primah(k,i,n)=(1/U_l(k,i,n))/((w*(1/(U_l(k,i,n)*(D_e+(w-
D_e)*F(k,i,n)))+(1/g_d)+1/(pi*D_i*h_fi(k,i,n))))); %%Hobbi
F_r(k,i,n)=((f_masicomin*c_f(k,i,n))/(A(k,i,n)*U_l(k,i,n)))*(1-exp(-
(F_primae(k,i,n)*U_l(k,i,n)*A(k,i,n))/(f_masicomin*c_f(k,i,n))));%%Eisenmann

%OBTENCIÓN RENDIMIENTO, TEMPERATURAS, ETC
Q_util(k,i,n)=A(k,i,n)*F_r(k,i,n)*(S-(U_l(k,i,n)*(T_fin(k,i,n)-T_a)));
T_abs_cal(k,i,n)=T_fin(k,i,n)+(Q_util(k,i,n)/(A(k,i,n)*U_l(k,i,n)*F_r(k,i,n)
))* (1-F_r(k,i,n)); %%Temperatura absoluta del absorbedor para qmin (K)
T_fout(k,i,n)=T_fin(k,i,n)+(Q_util(k,i,n)/(f_masicomin*c_f(k,i,n)));
%%Temperatura de salida qmin
j=j+1;
T_abs(j)=T_abs_cal(k,i,n);
end
j=2;
%T_abs(k,i)=T_abs_cal(k,i)

```

```

T_fin(k,i+1,n)=T_fout(k,i,n);
end
end
for k=1:size(T_finn,2)
eficiencia(k,n)=sum(Q_util(k,:,n))/(W*L/9*G); %Eficiencia de colector con
caudal mínimo establecido
T_out(k,n)=T_fout(k,casos,n);
T_absorbedor(k,n)=mean(T_abs_cal(k,:,n));
t_m(k,n)=(T_finn(k)+T_fout(k,casos,n))/2; %Temperatura mkzedia del fluido de
transferenciad de calor (K)
T_m(k,n)=(t_m(k,n)-T_a)/G; %(Tm*) Tadimensional Diferencia de Ta absoluta
reducida (m2K/W)
EFI_SOL_1(k,n)=0.787-4.653.*T_m(k,n);
EFI_SOL_2(k,n)=0.799-3.4.*T_m(k,n)-0.026.*G.*T_m(k,n)^2;
end
end

for l=1:size(PD,2)
DATOS(:, :, l)=[T_finn' T_out(:, l) T_absorbedor(:, l) T_m(:, l) eficiencia(:, l)
EFI_SOL_1(:, l) EFI_SOL_2(:, l)]
end

figure(1)
plot(DATOS(:, 4, 1), DATOS(:, 5, 1), 'ko', DATOS(:, 4, 2), DATOS(:, 5, 2), 'k<', DATOS(:, 4,
3), DATOS(:, 5, 3), 'ks', DATOS(:, 4, 4), DATOS(:, 5, 4), 'kd', ...
DATOS(:, 4, 4), DATOS(:, 5, 4), 'kx')

P=polyfit(DATOS(:, 4), DATOS(:, 5), 1)
A=polyfit(DATOS(:, 4), DATOS(:, 5), 2)

EFI_CAL_1=P(2)+P(1).*DATOS(:, 4);
EFI_CAL_2=A(3)+A(2).*DATOS(:, 4)+(A(1)/G).*DATOS(:, 4).^2;

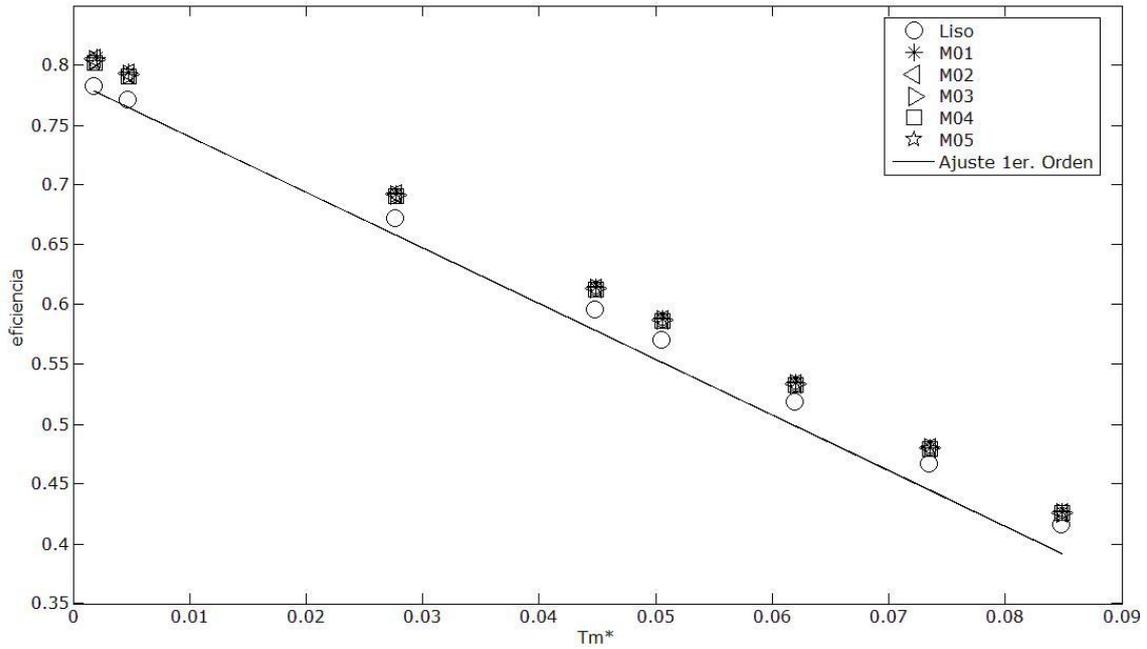
```


**ANEXO III:
RELACIÓN DE CURVAS DE
EFICIENCIA PARA LOS DISTINTOS
MUELLES INSERTADOS**

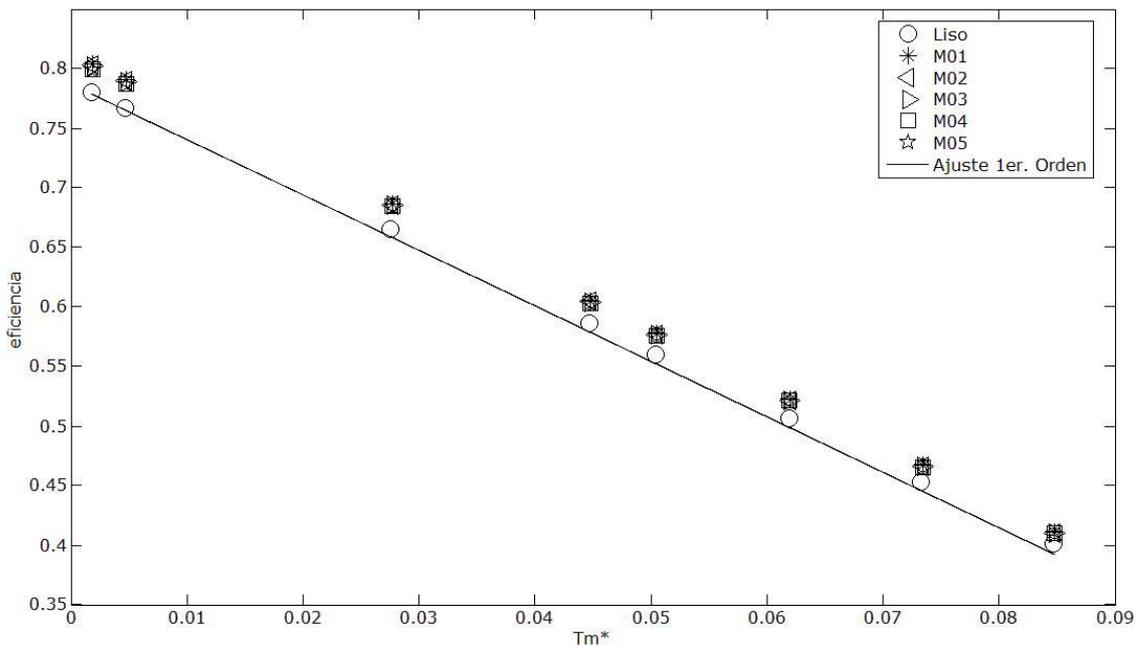
Relación de curvas de eficiencia basadas en la influencia de variables de estado del colector para muelles con espesor adimensional de 0,074.-

- Influencia velocidad del viento (u):

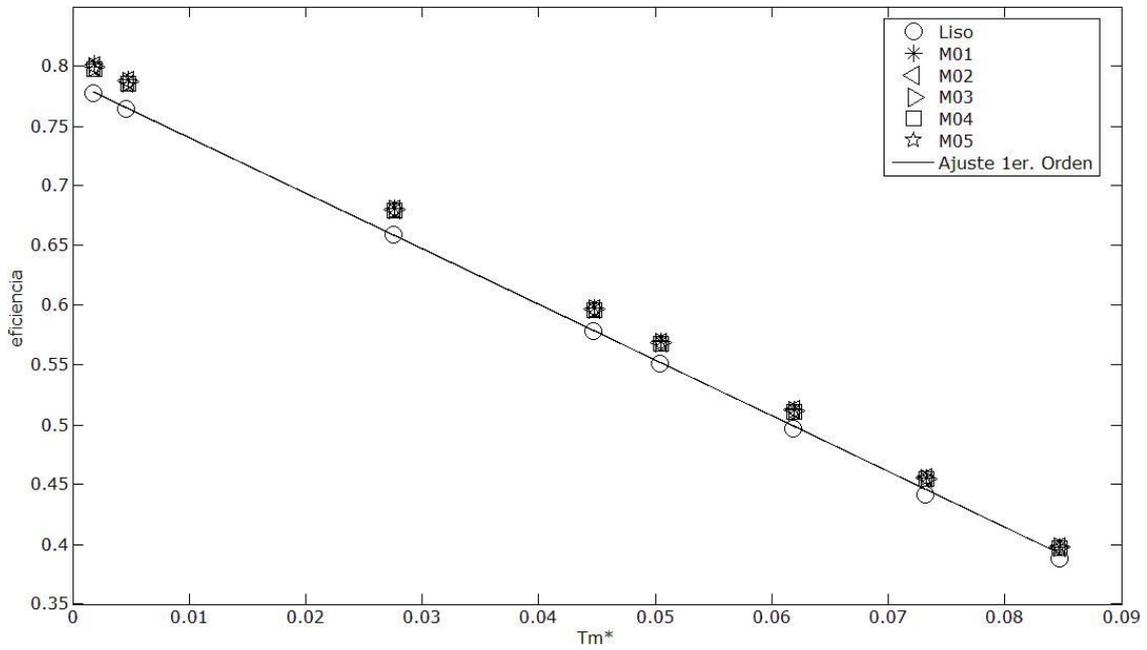
○ $u = 0,5$ m/s.



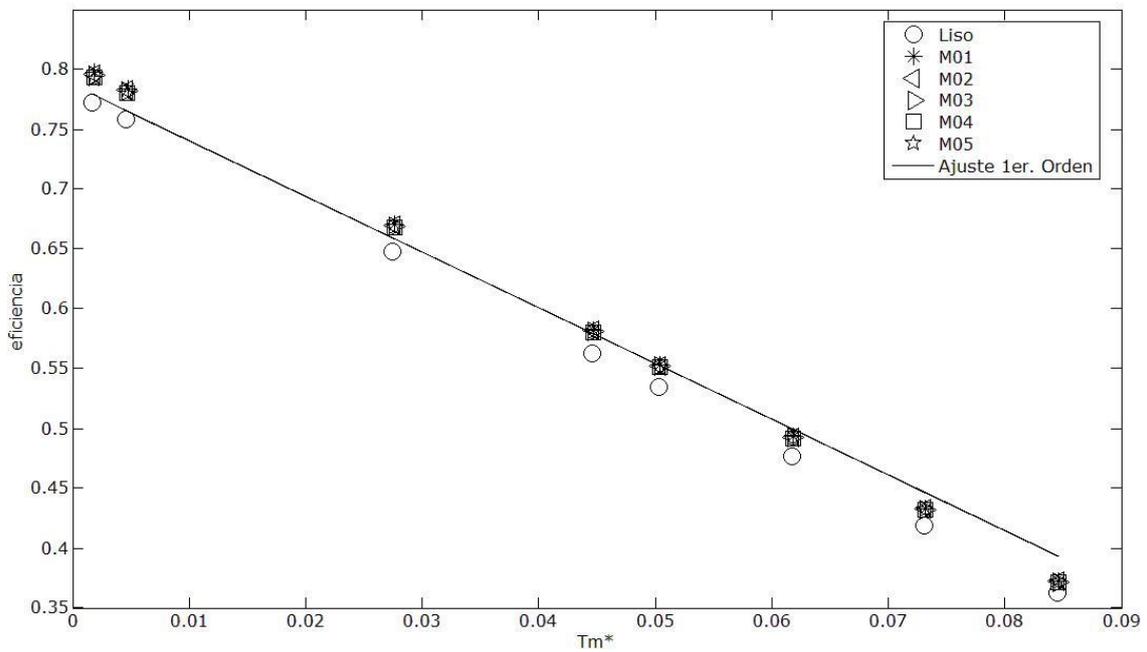
○ $u = 1$ m/s.



○ $u = 1,5$ m/s.

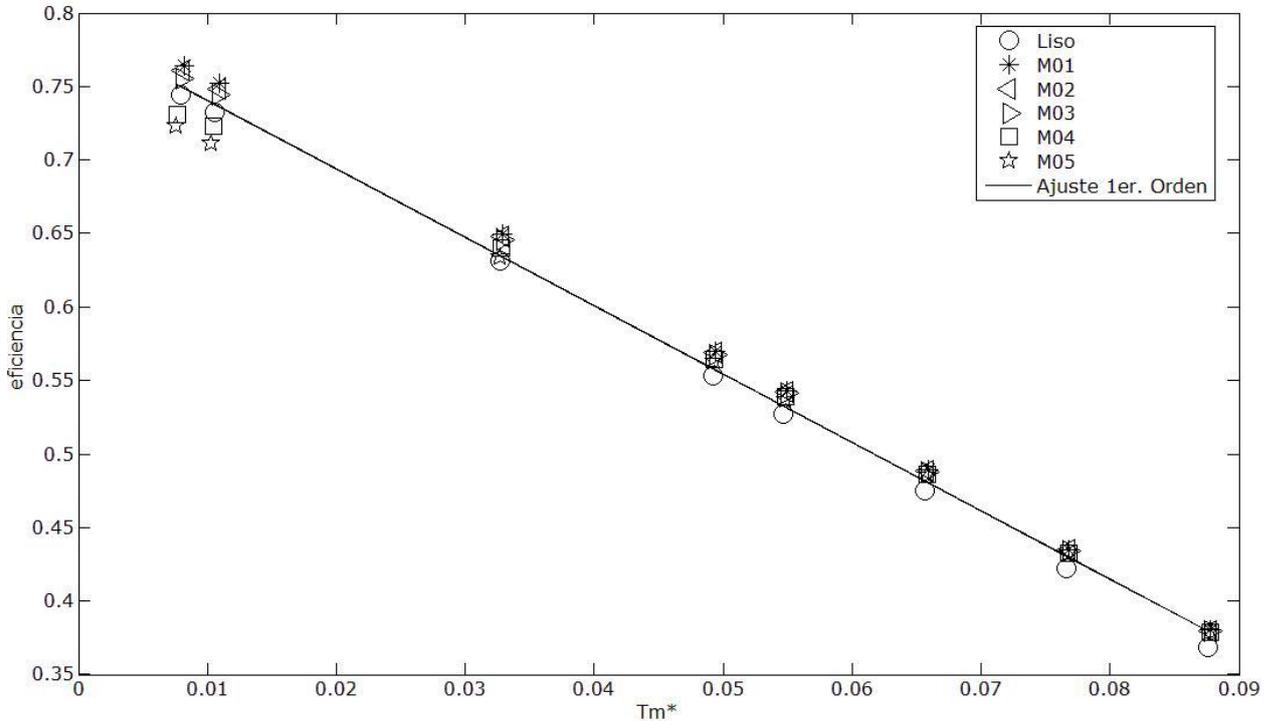


○ $u = 3$ m/s.

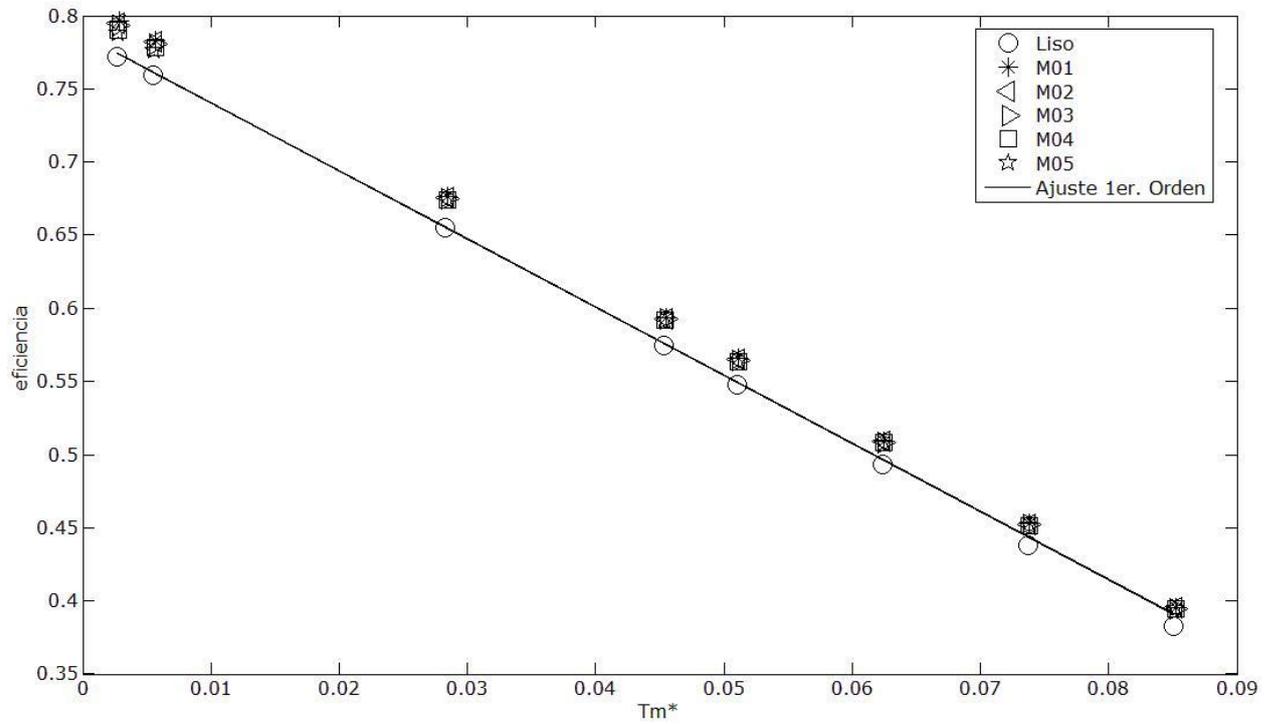


- Influencia caudal (q):

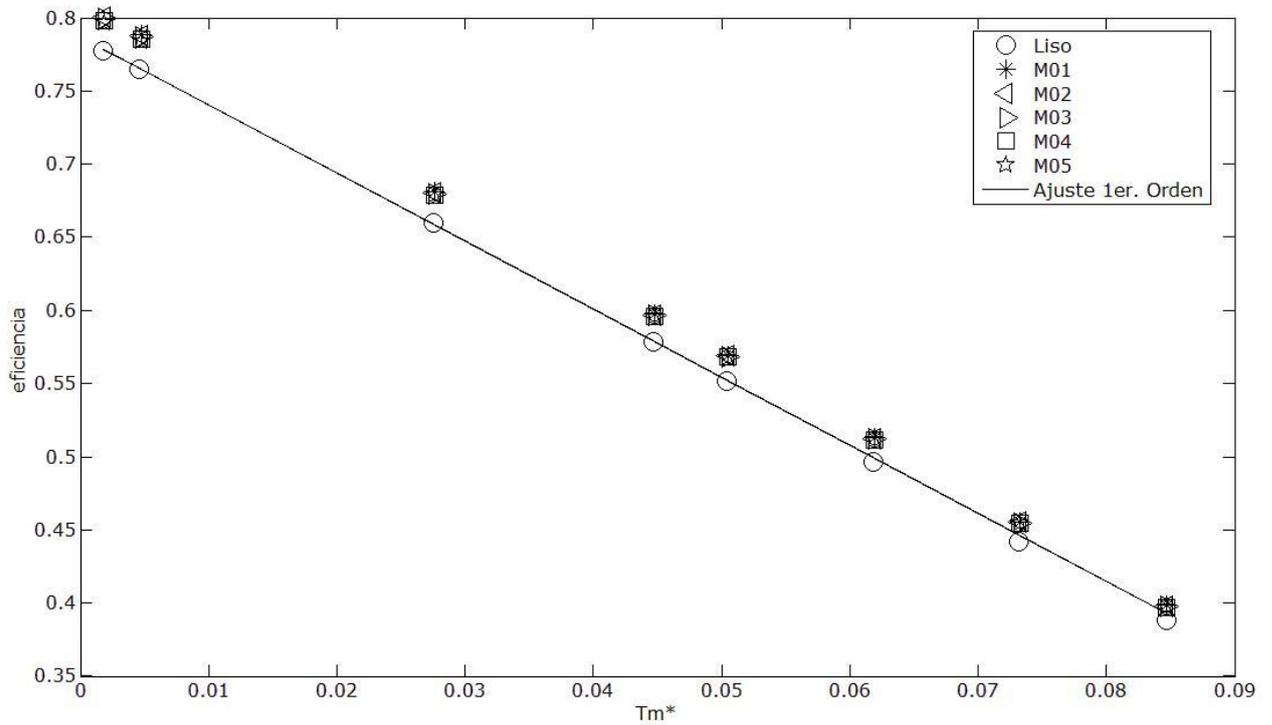
- $q = 30 \text{ l}\cdot\text{h}/\text{m}^2$



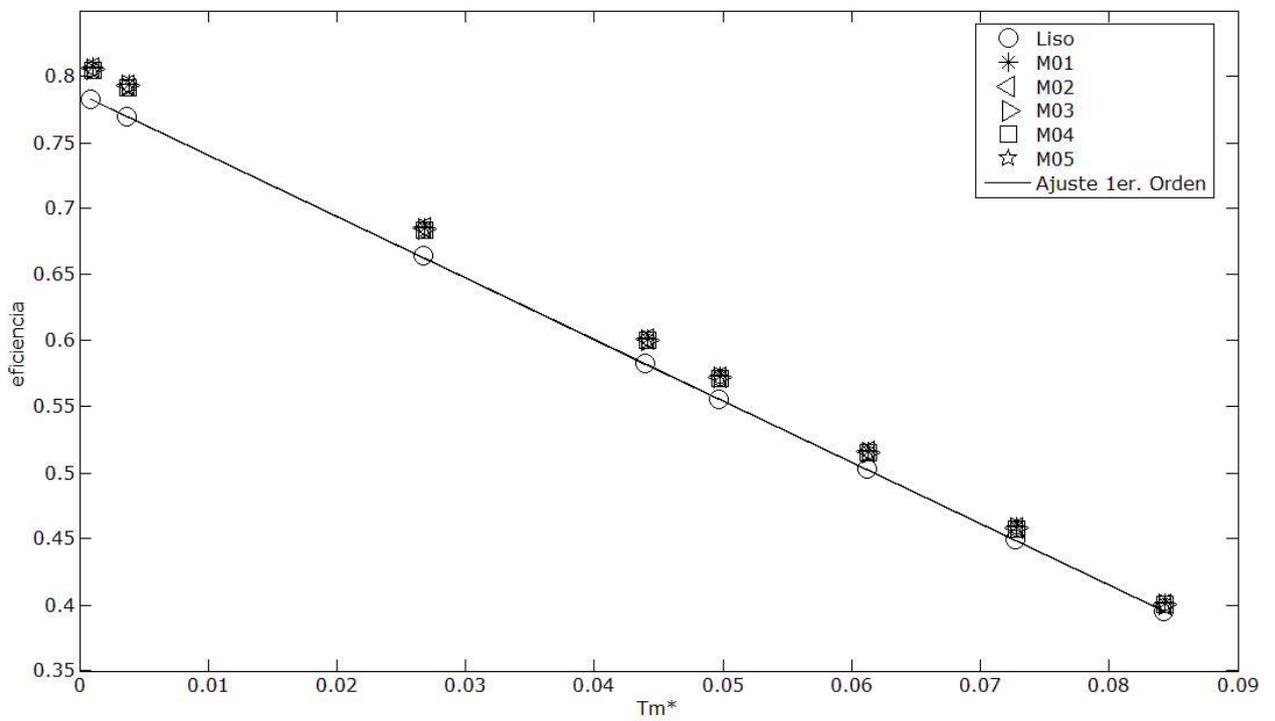
- $q = 60 \text{ l}\cdot\text{h}/\text{m}^2$



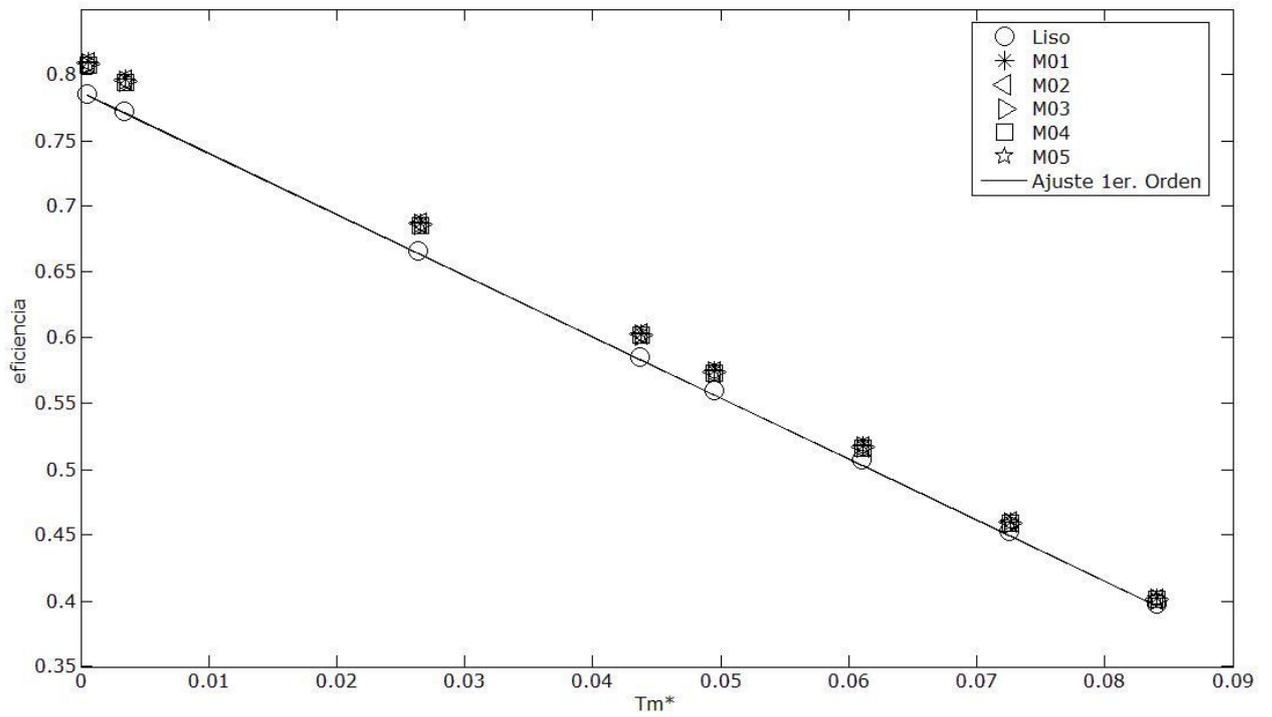
○ $q = 72 \text{ l}\cdot\text{h}/\text{m}^2$



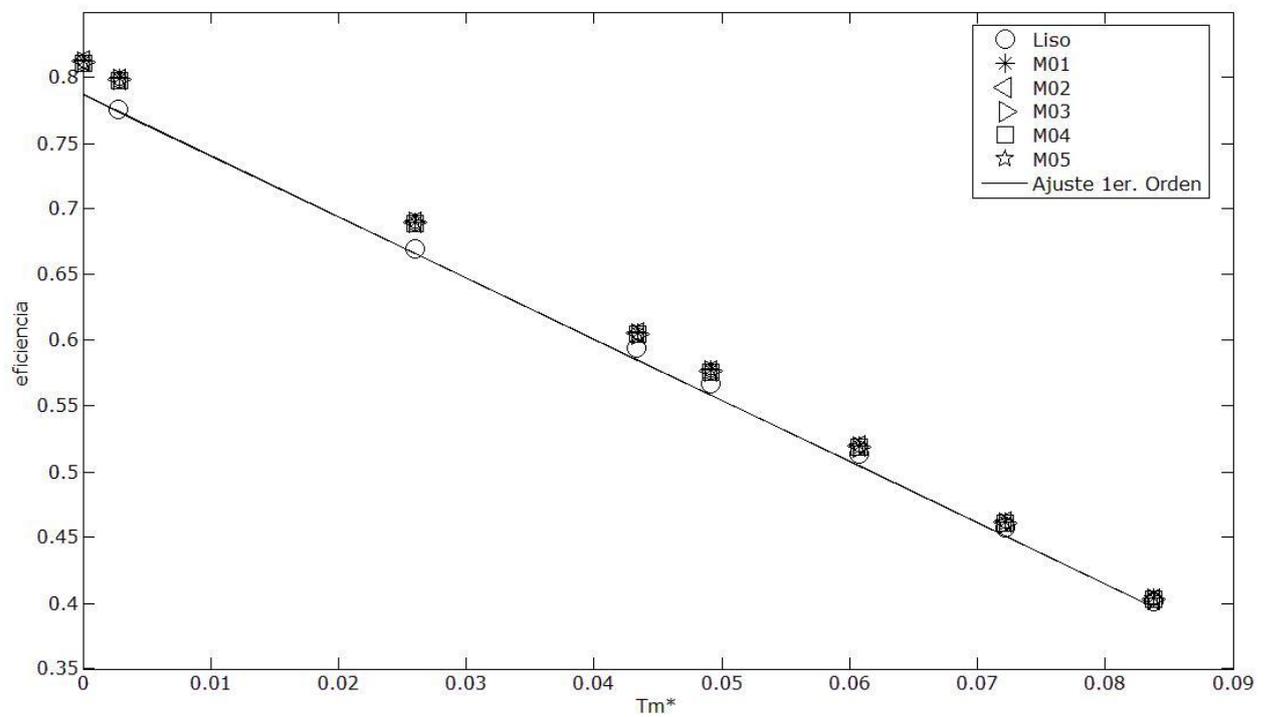
○ $q = 90 \text{ l}\cdot\text{h}/\text{m}^2$



○ $q = 100 \text{ l}\cdot\text{h}/\text{m}^2$

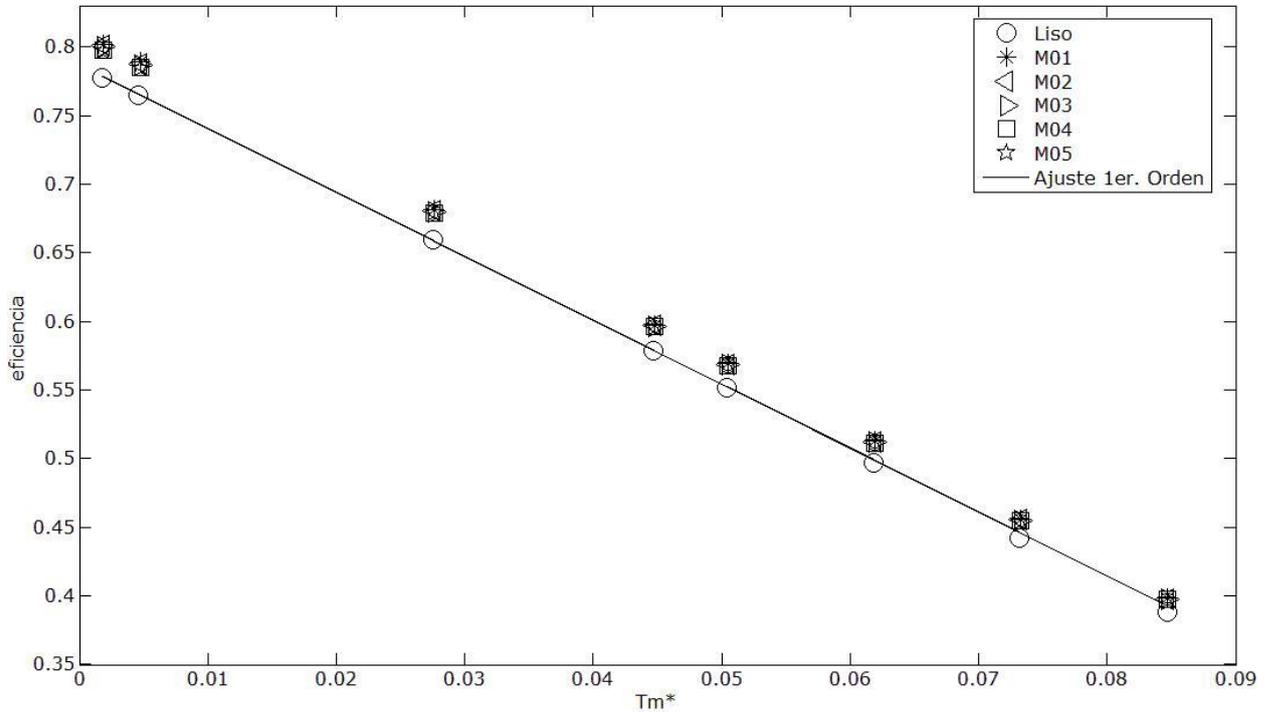


○ $q = 120 \text{ l}\cdot\text{h}/\text{m}^2$

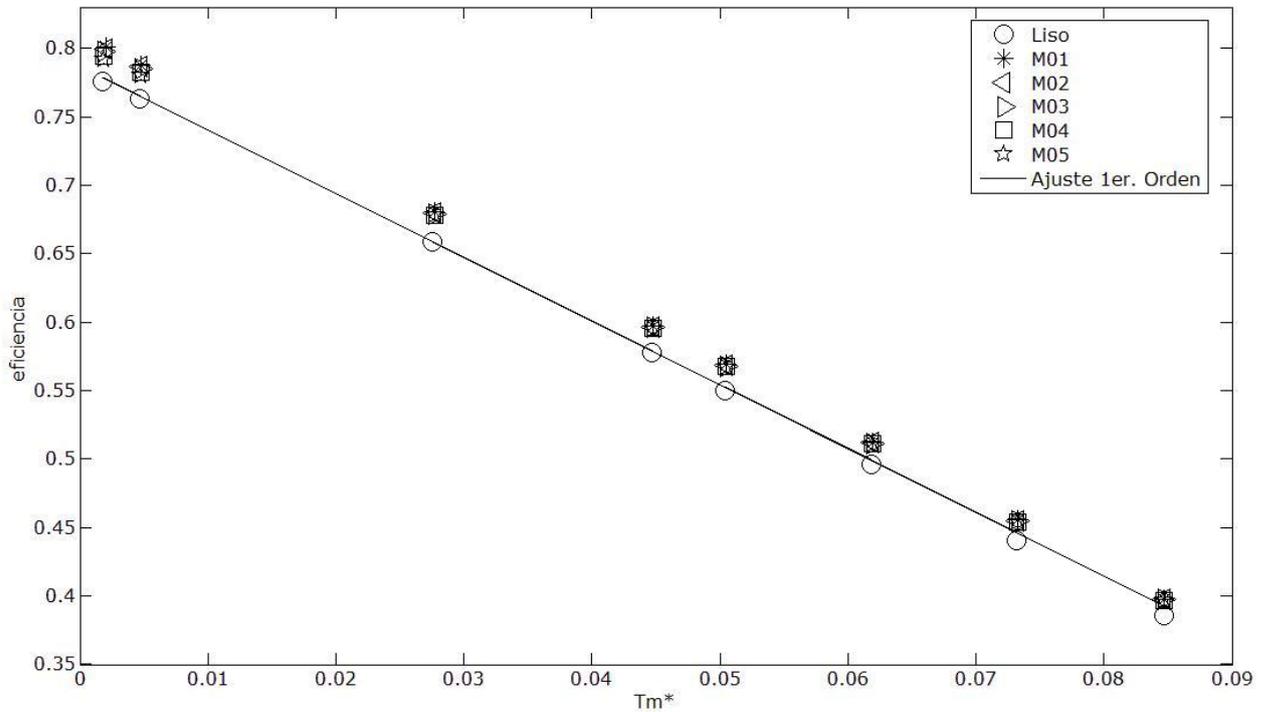


- Influencia concentración (% PPG):

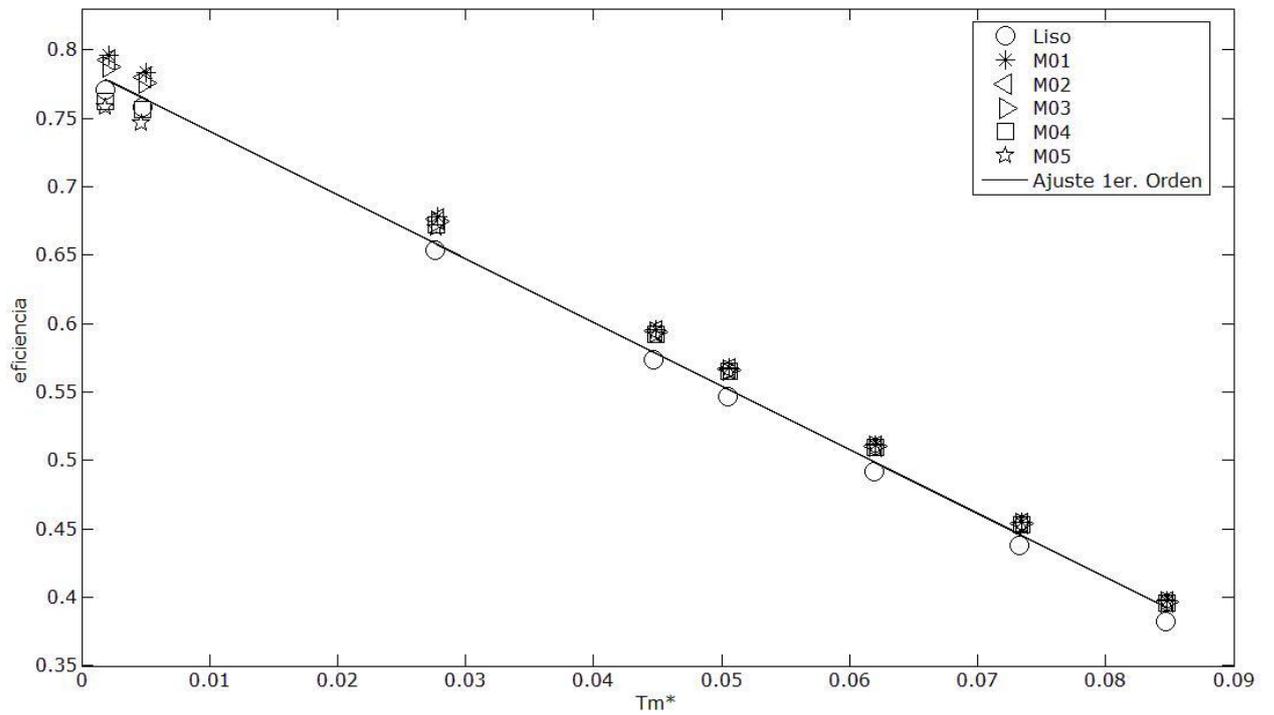
- 0% PPG



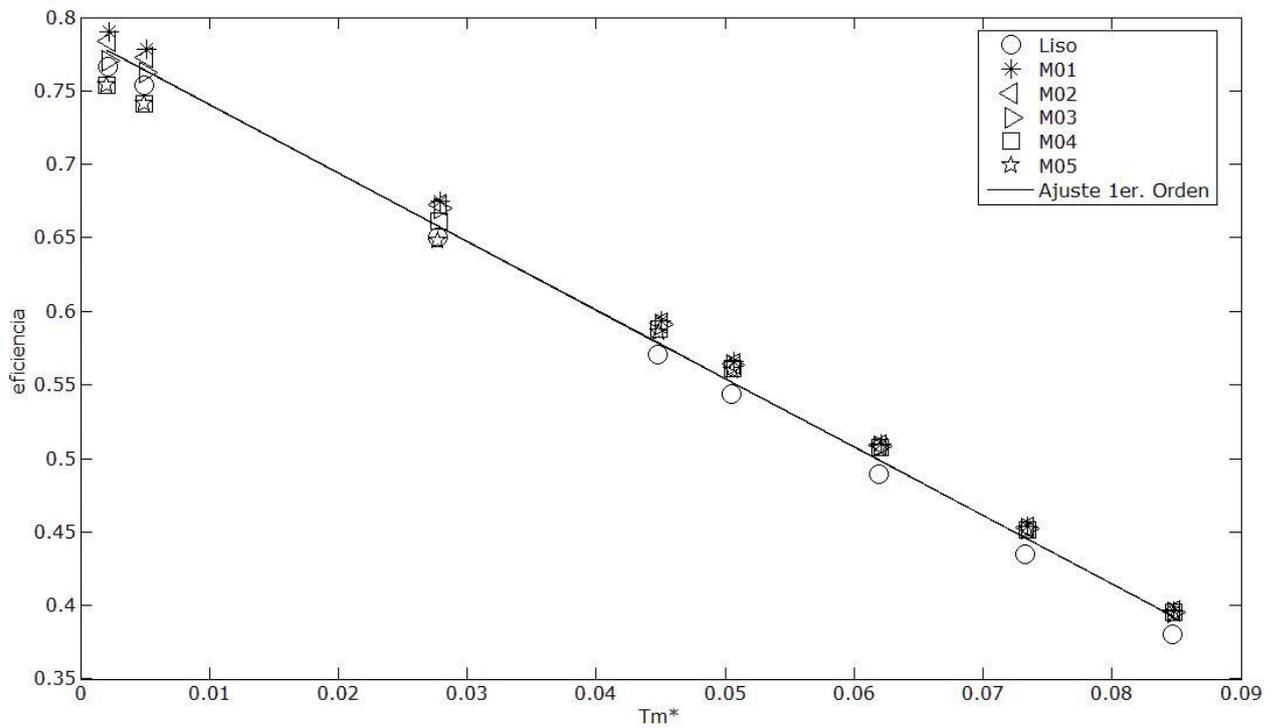
- 5% PPG



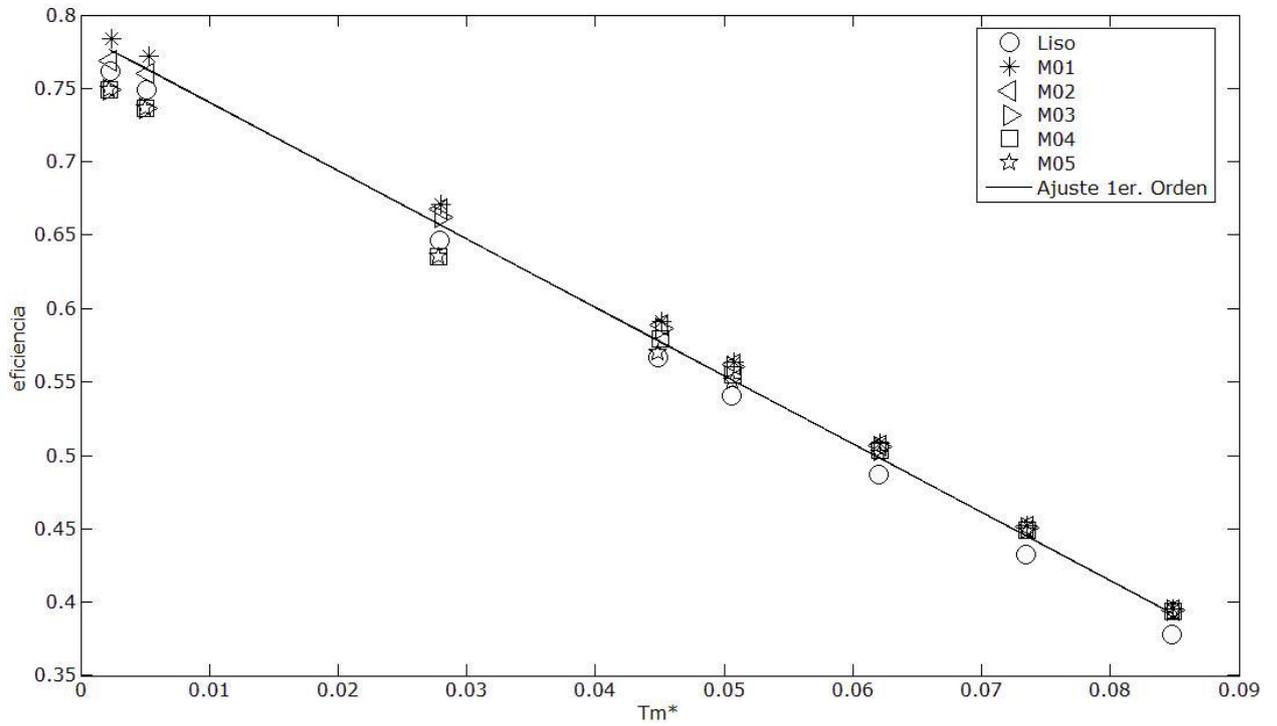
○ 20% PPG



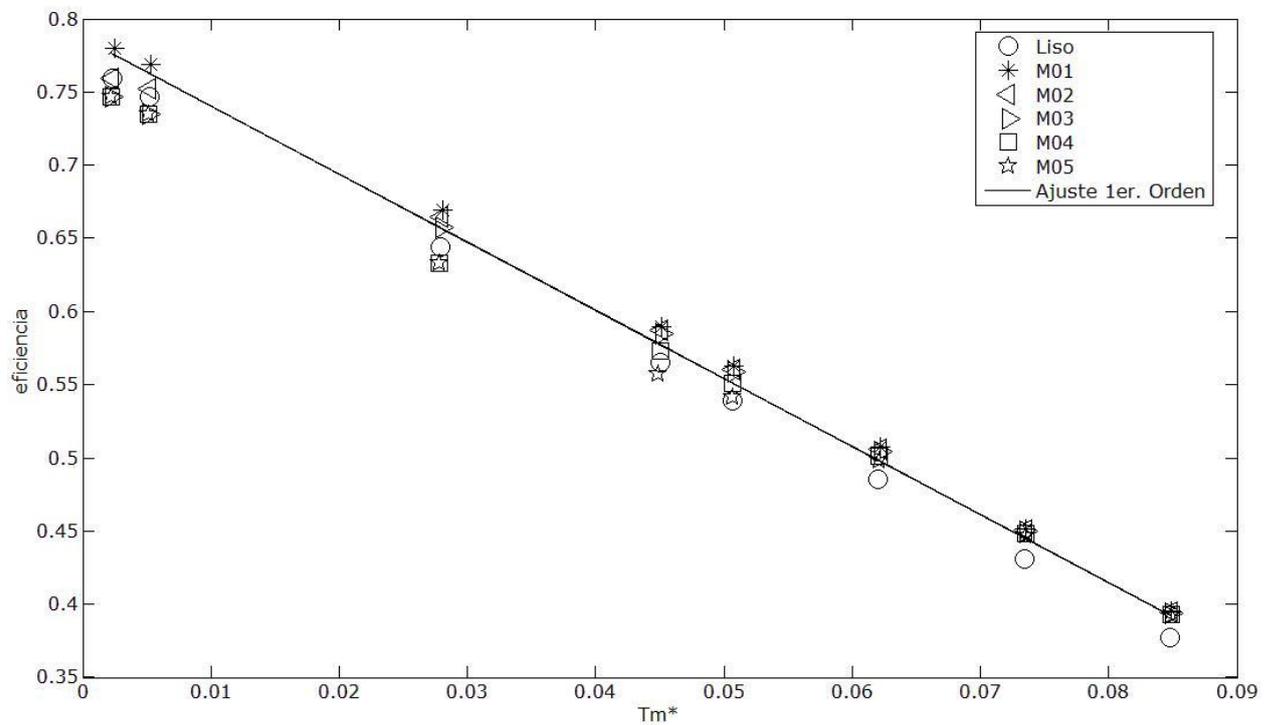
○ 30% PPG



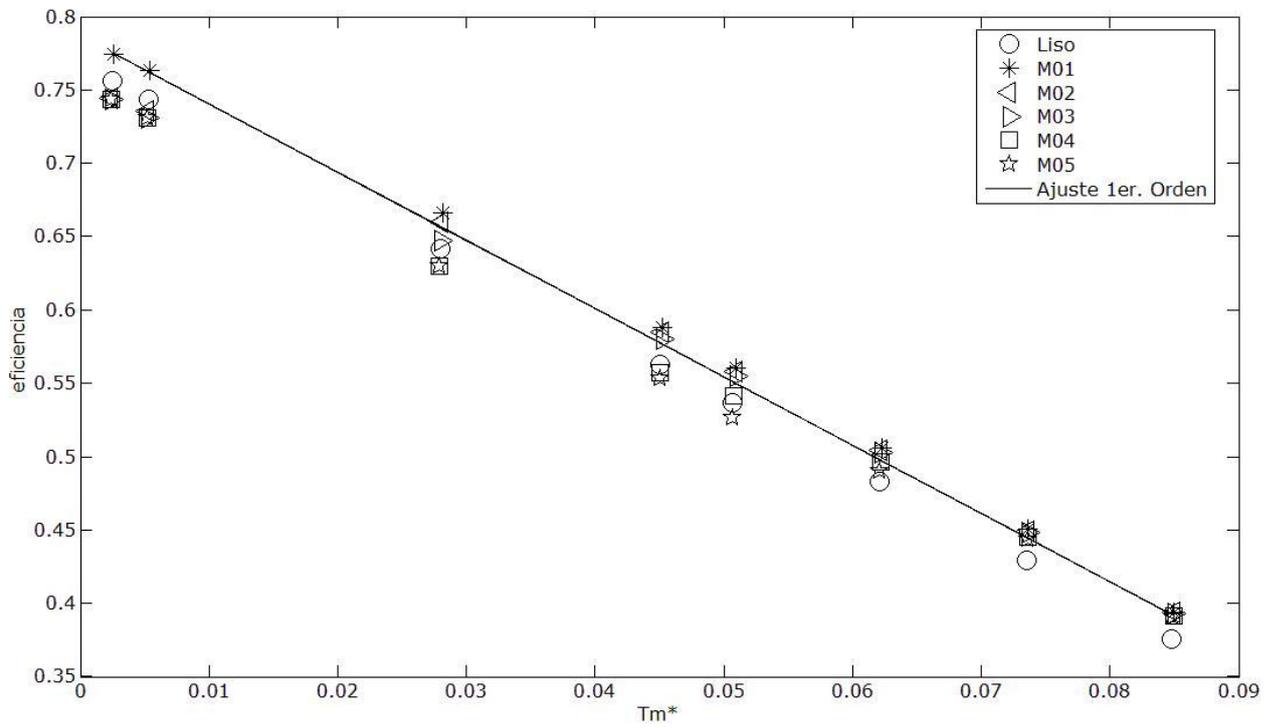
○ 40% PPG



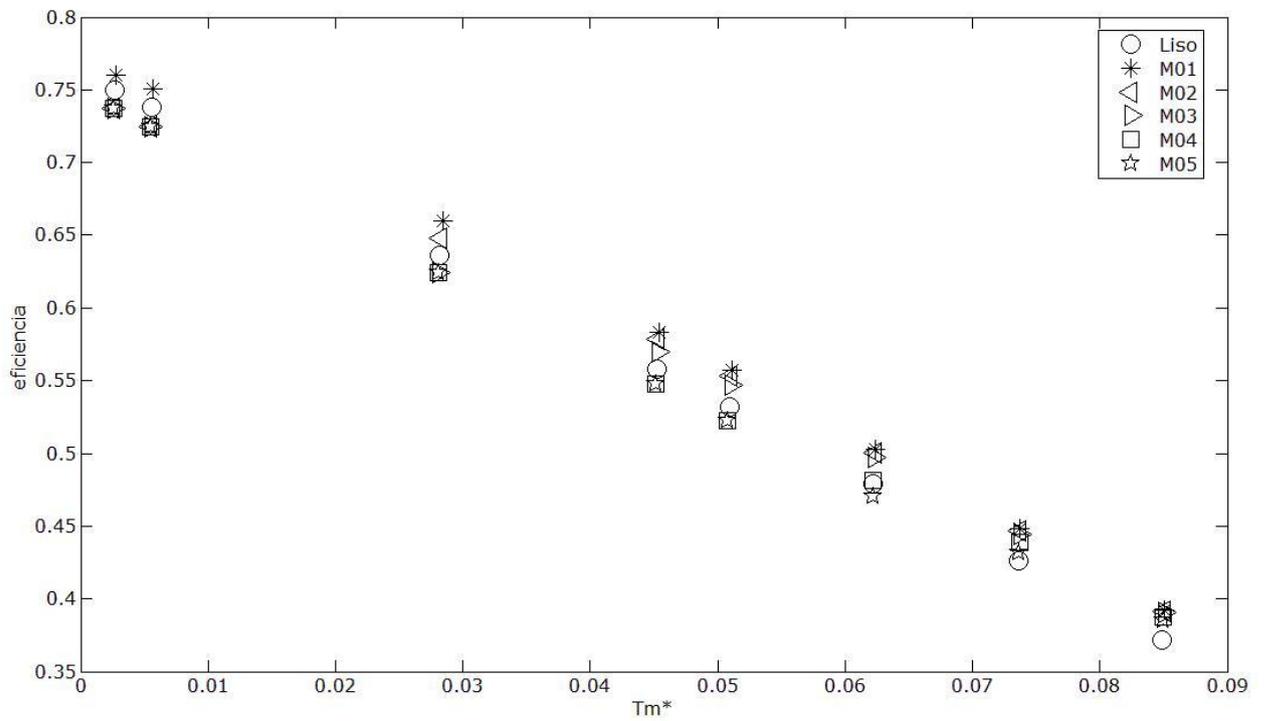
○ 44% PPG



○ 50% PPG



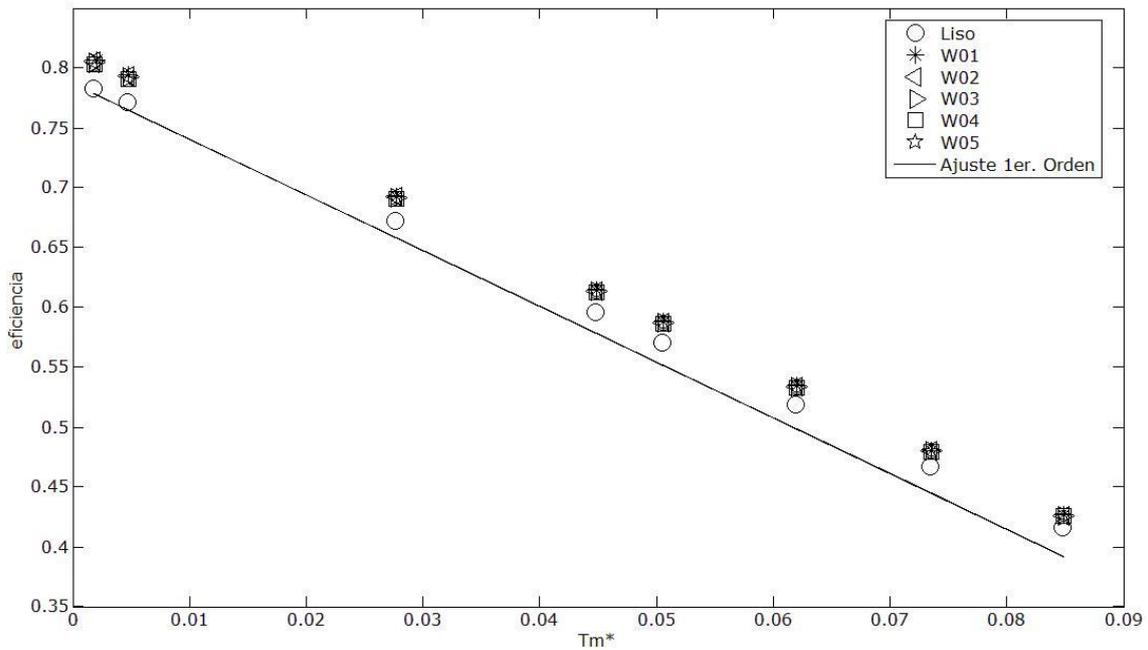
○ 60% PPG



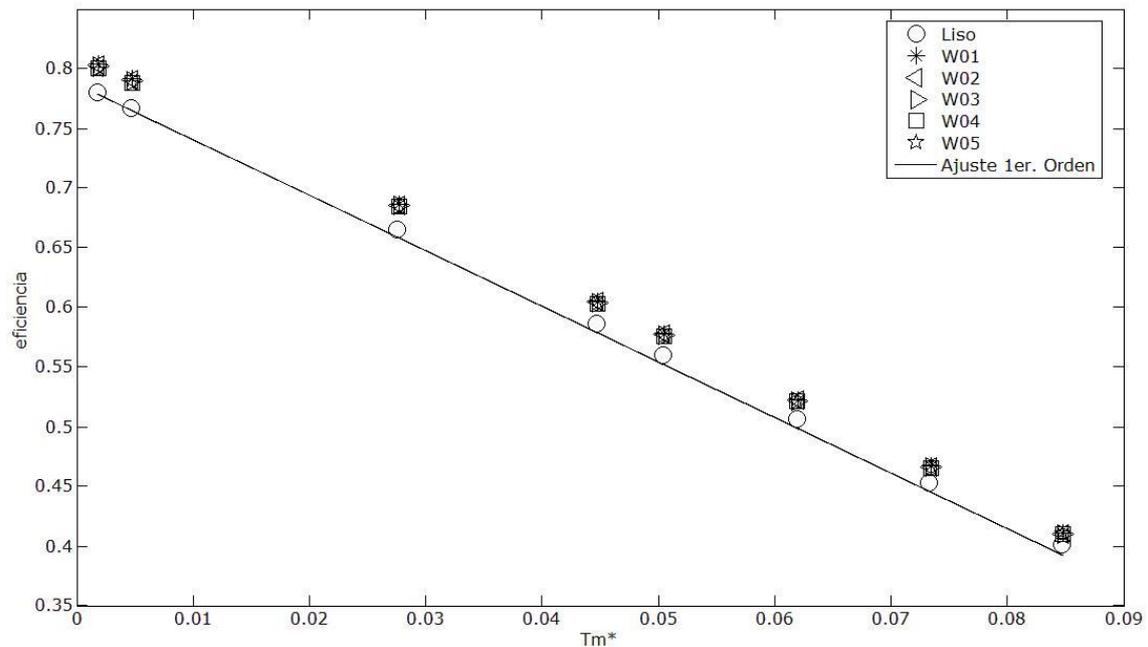
Relación de curvas de eficiencia basadas en la influencia de variables de estado del colector para muelles con espesor adimensional de 0,1.-

- Influencia velocidad del viento (u):

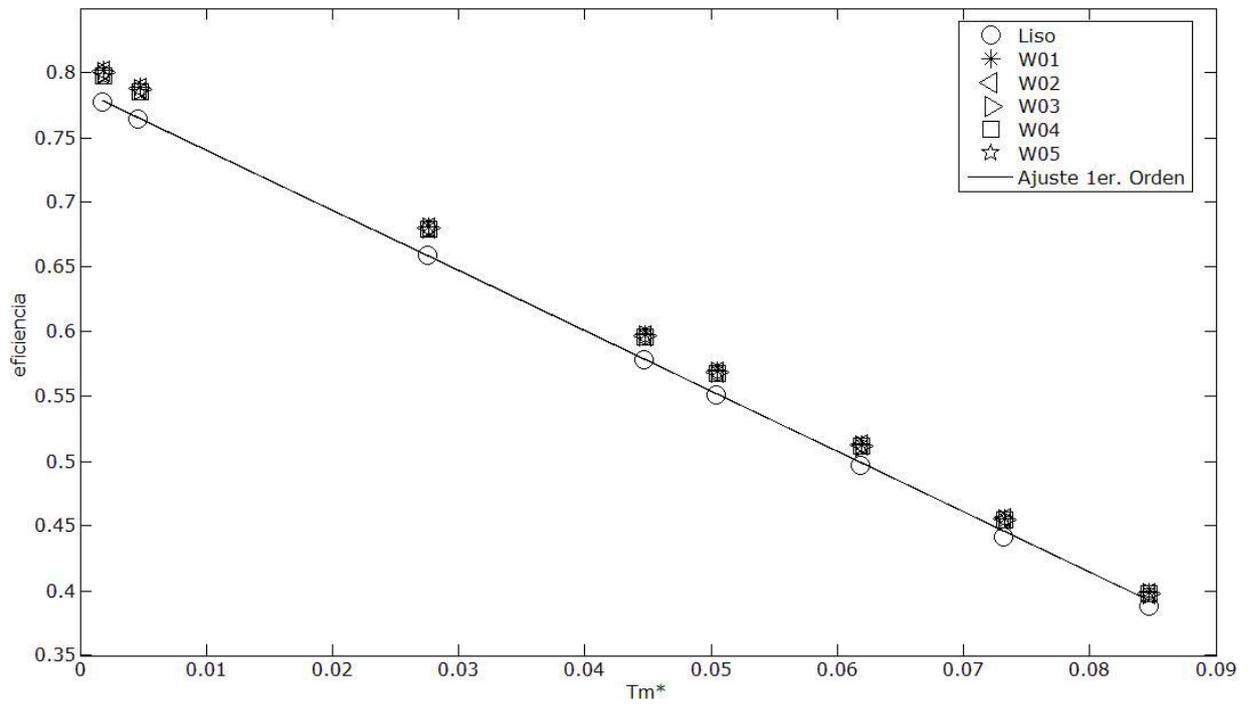
○ $u = 0,5 \text{ m/s}$



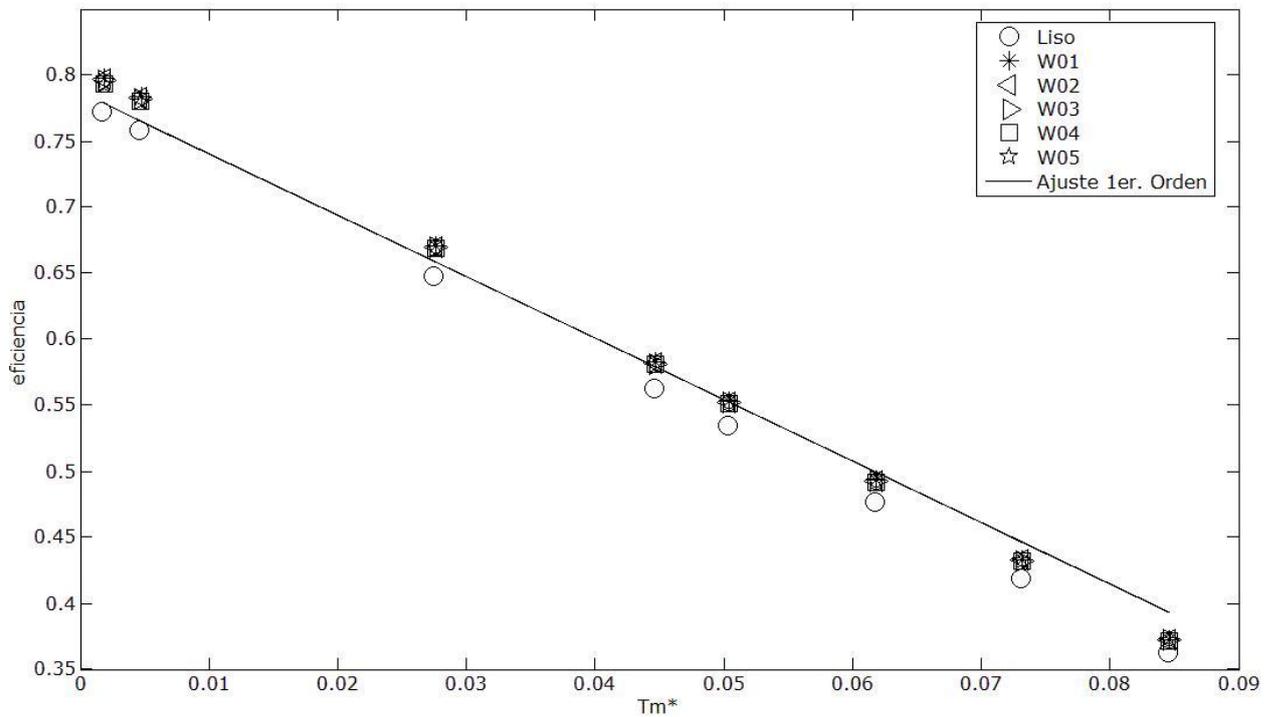
○ $u = 1 \text{ m/s}$



○ $u = 1,5 \text{ m/s}$

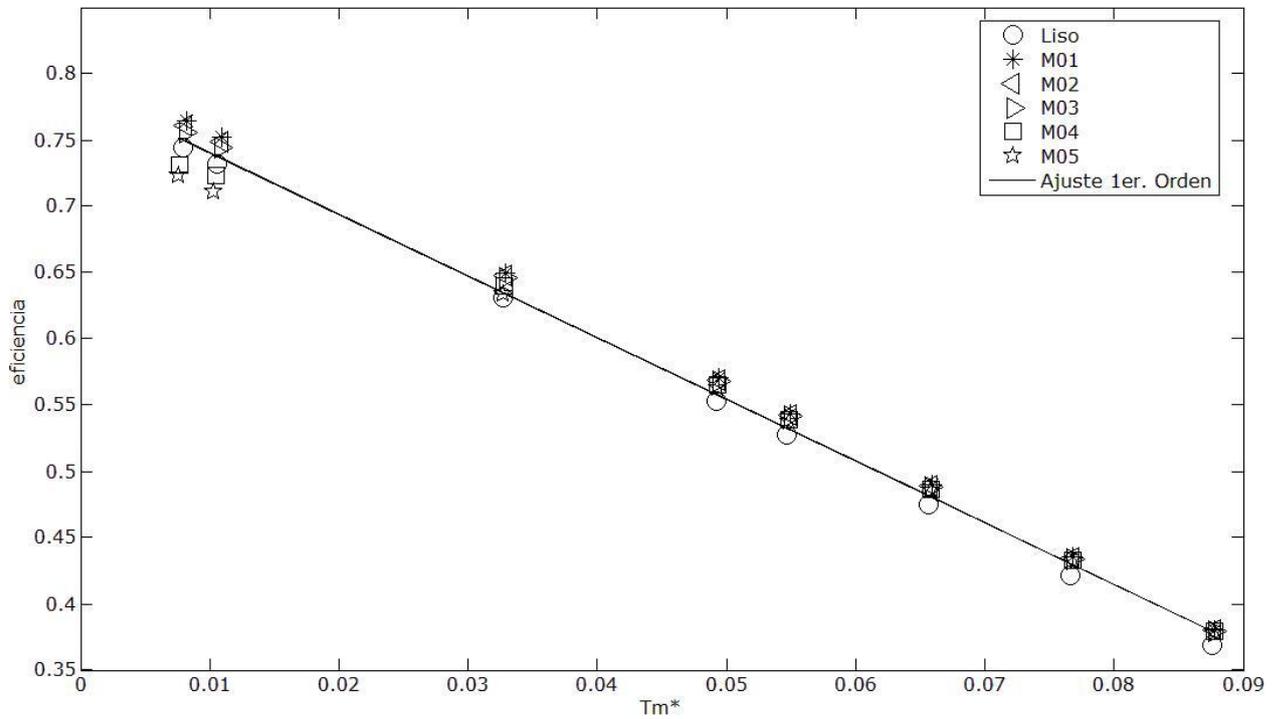


○ $u = 3 \text{ m/s}$

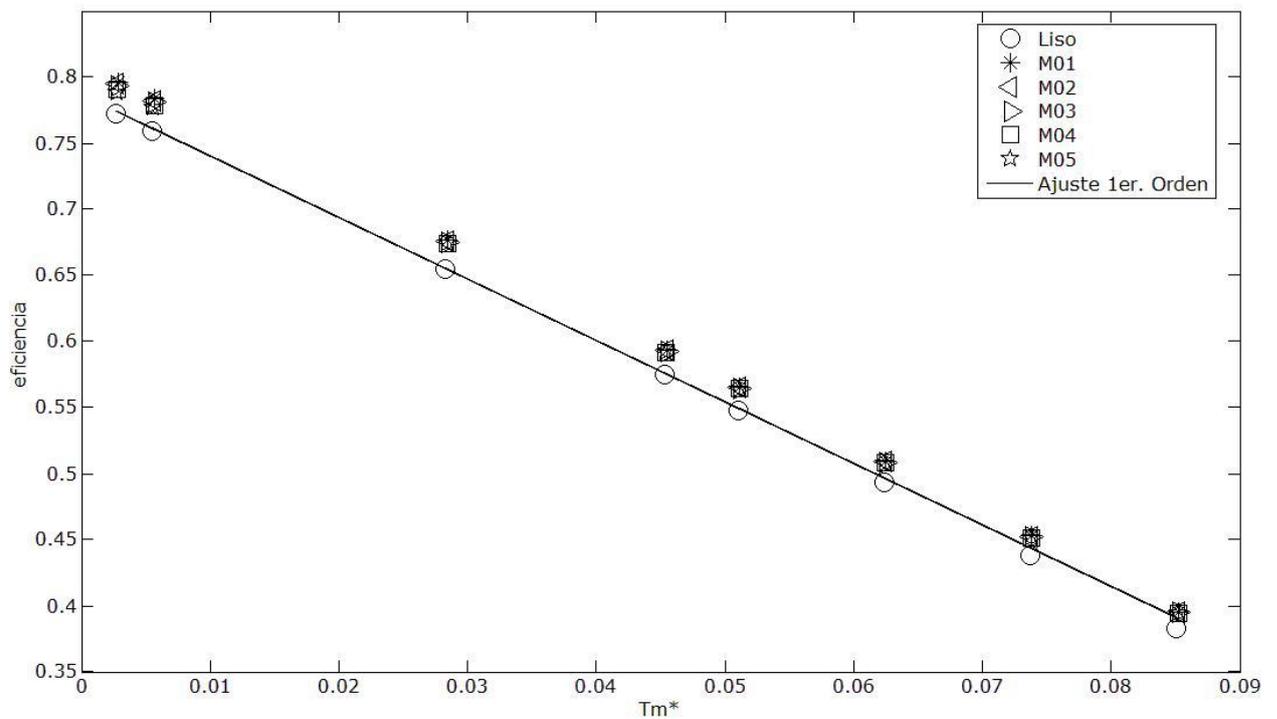


- Influencia caudal (q):

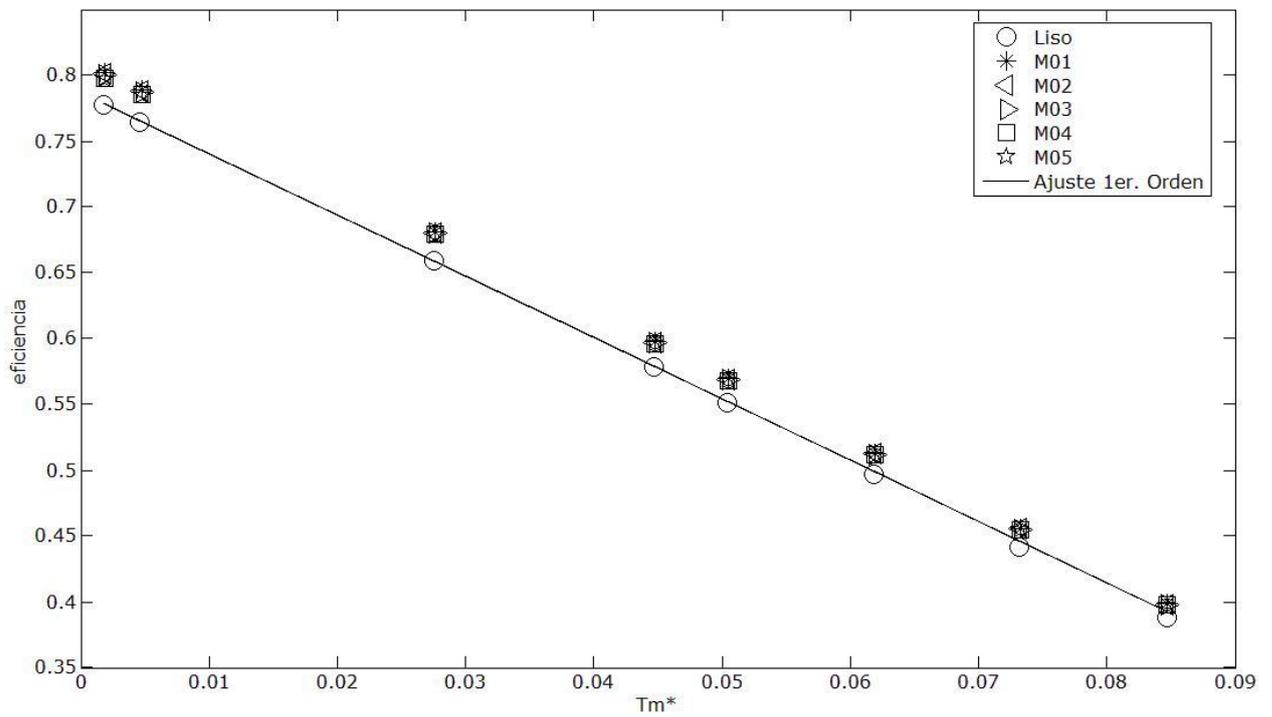
- $q = 30 \text{ l}\cdot\text{h}/\text{m}^2$



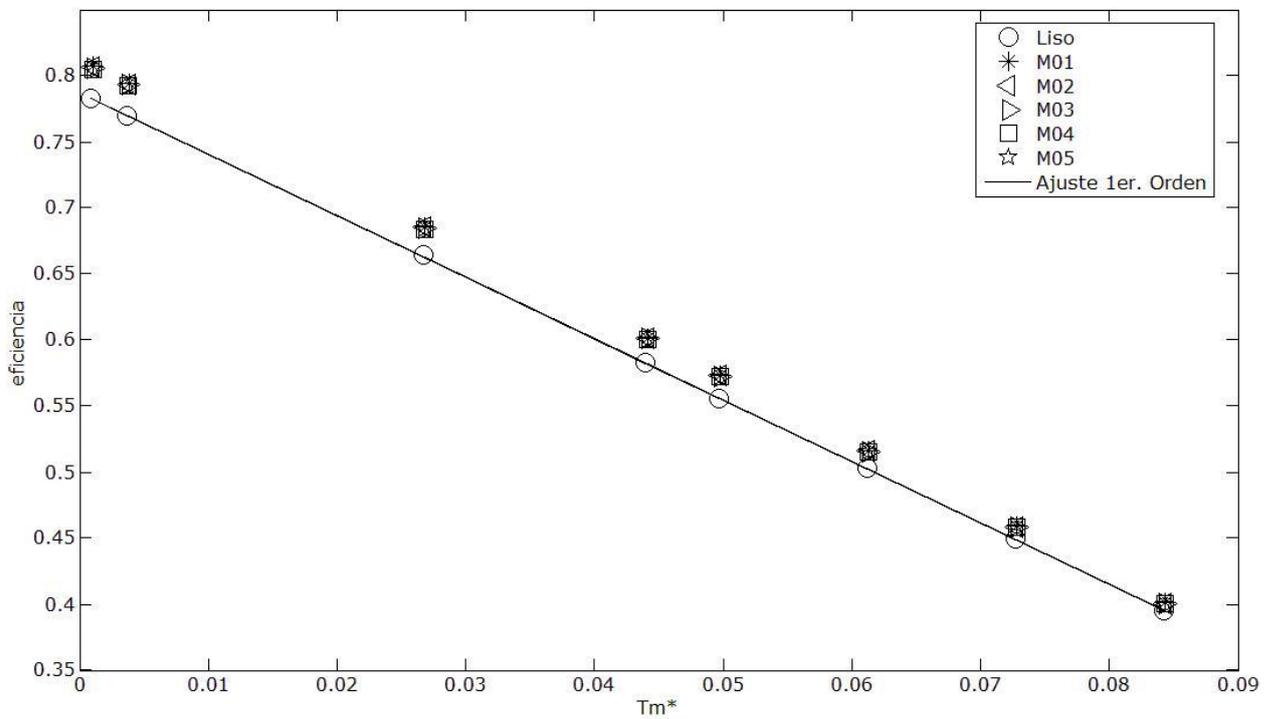
- $q = 60 \text{ l}\cdot\text{h}/\text{m}^2$



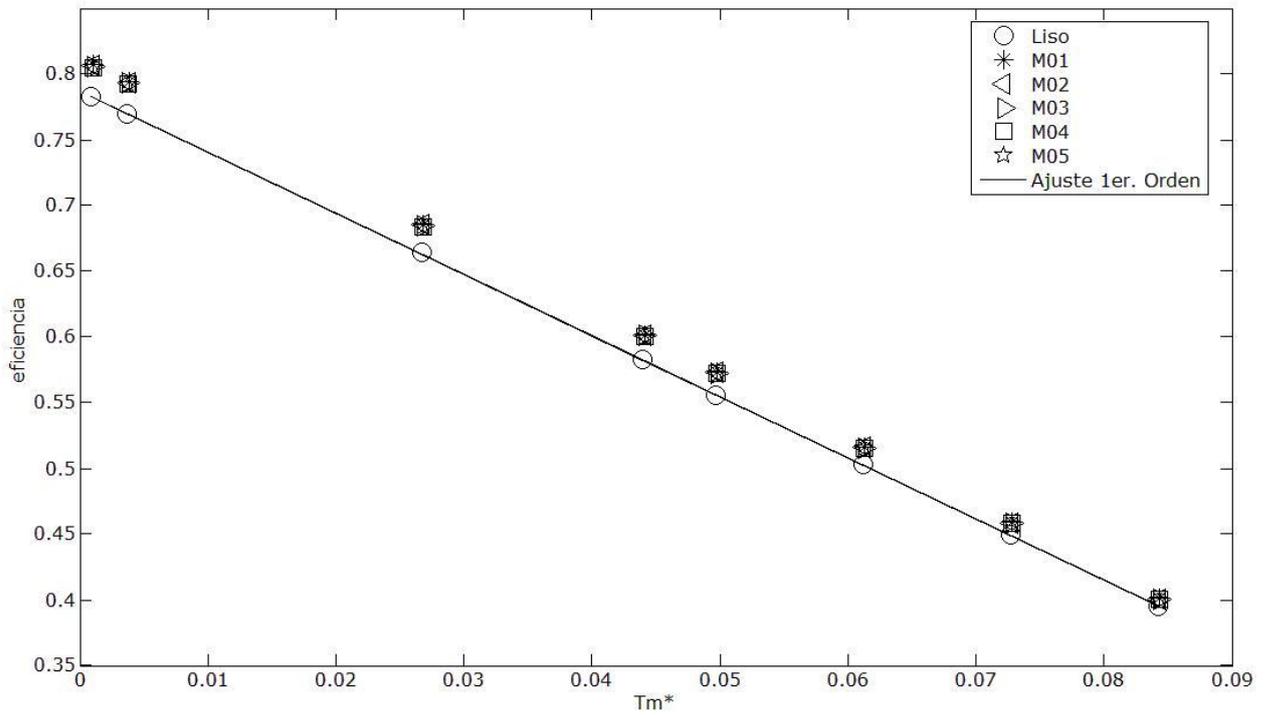
○ $q = 72 \text{ l}\cdot\text{h}/\text{m}^2$



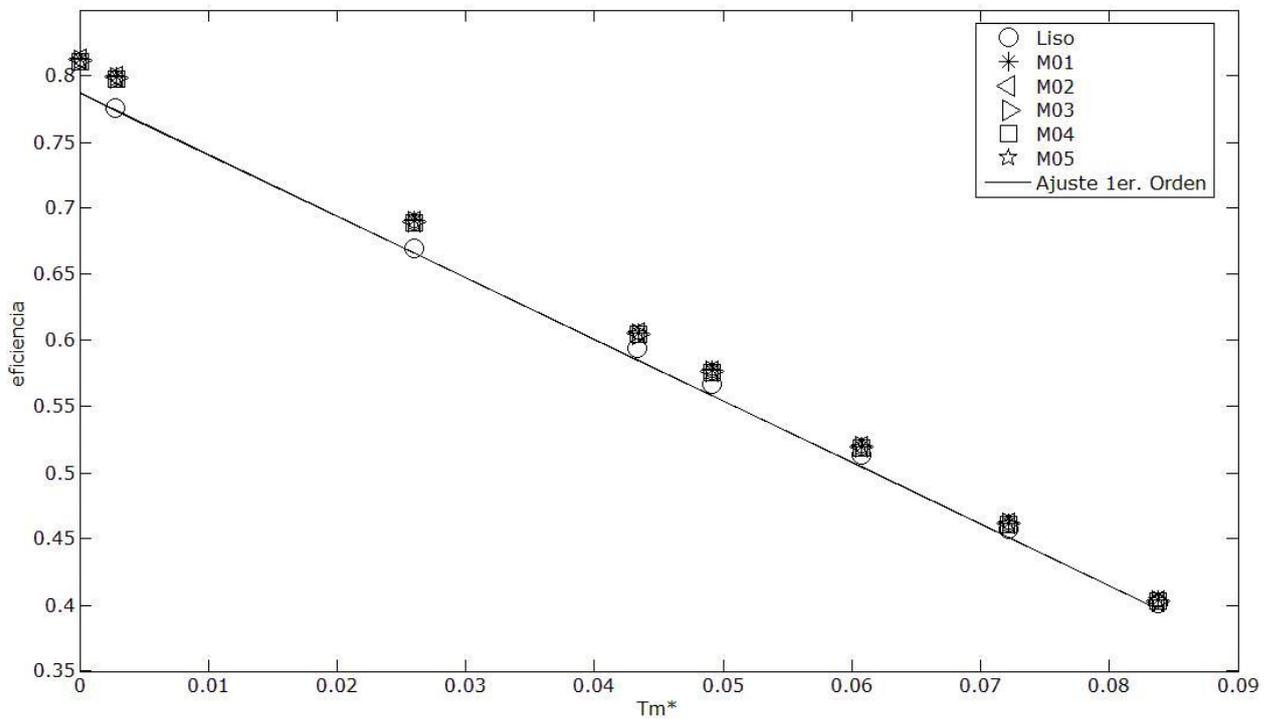
○ $q = 90 \text{ l}\cdot\text{h}/\text{m}^2$



○ $q = 100 \text{ l}\cdot\text{h}/\text{m}^2$

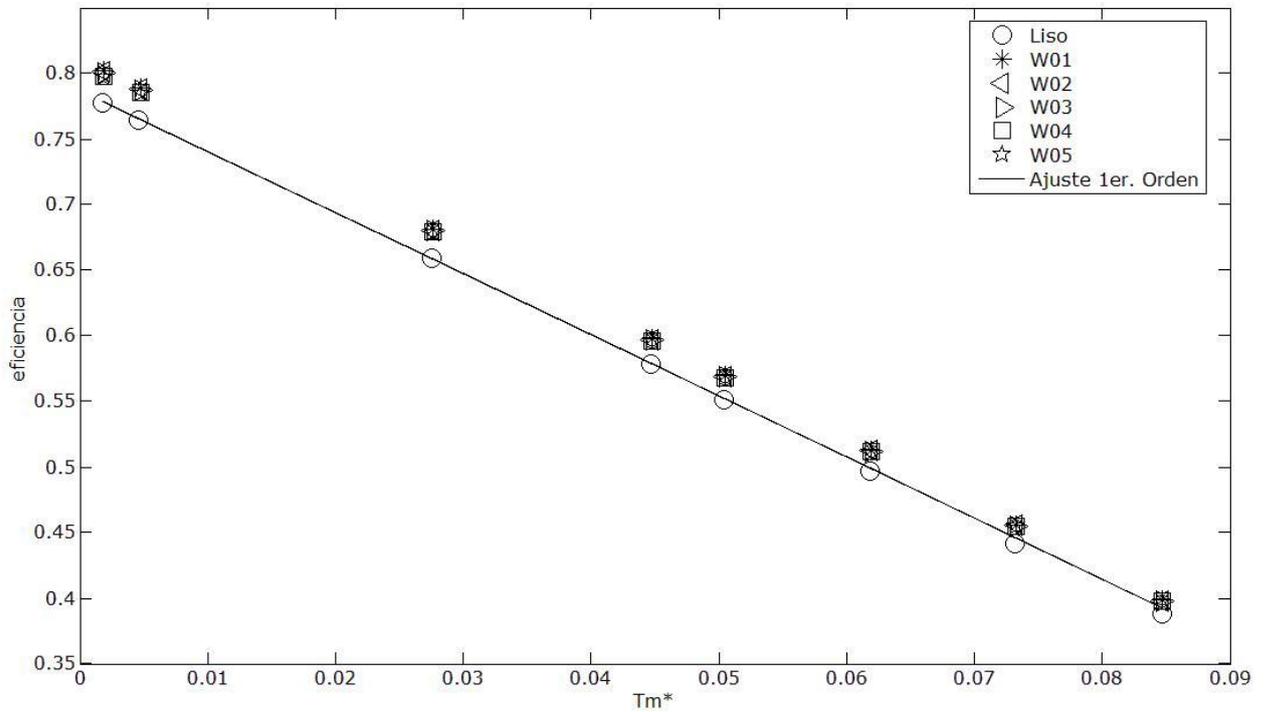


○ $q = 120 \text{ l}\cdot\text{h}/\text{m}^2$

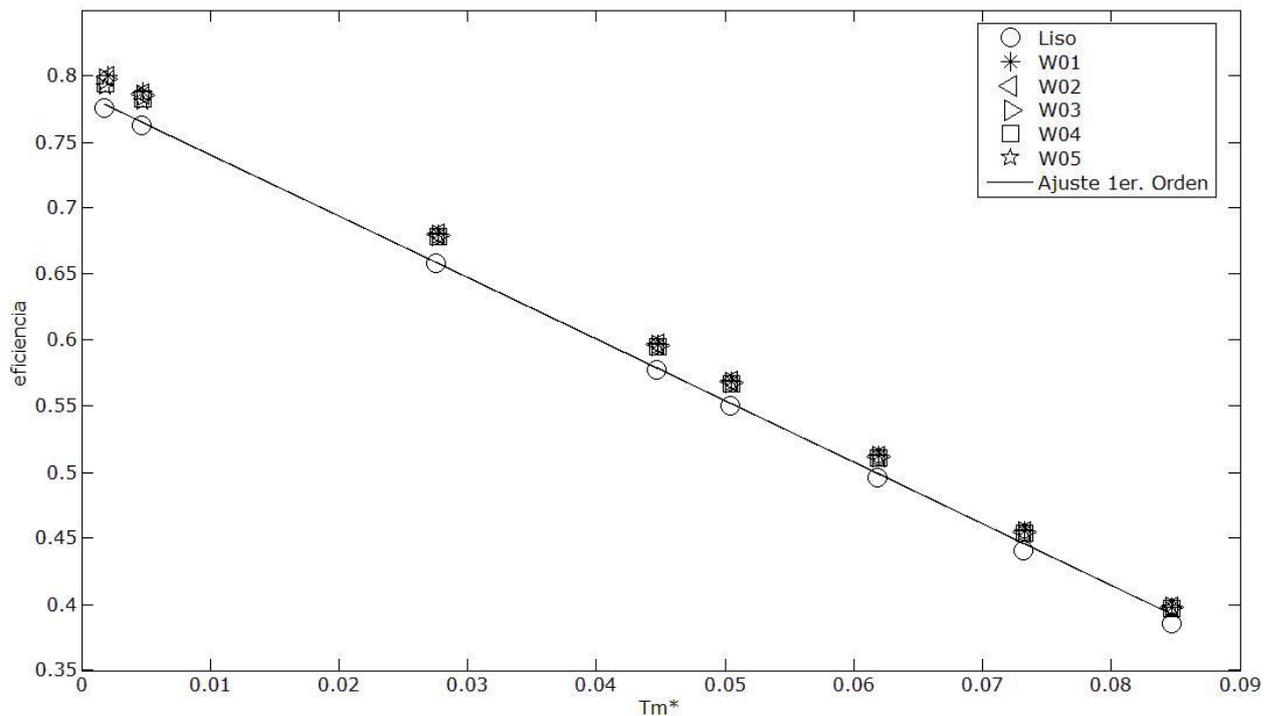


- Influencia concentración (% PPG):

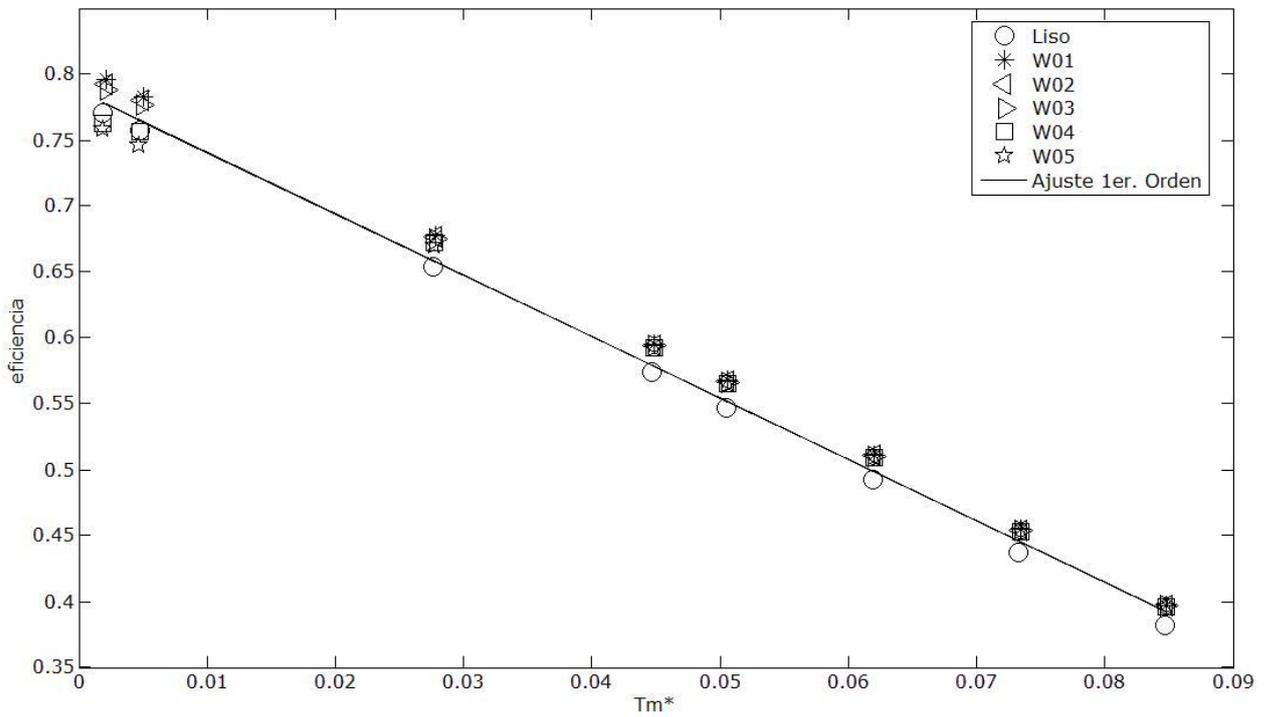
- 0% PPG



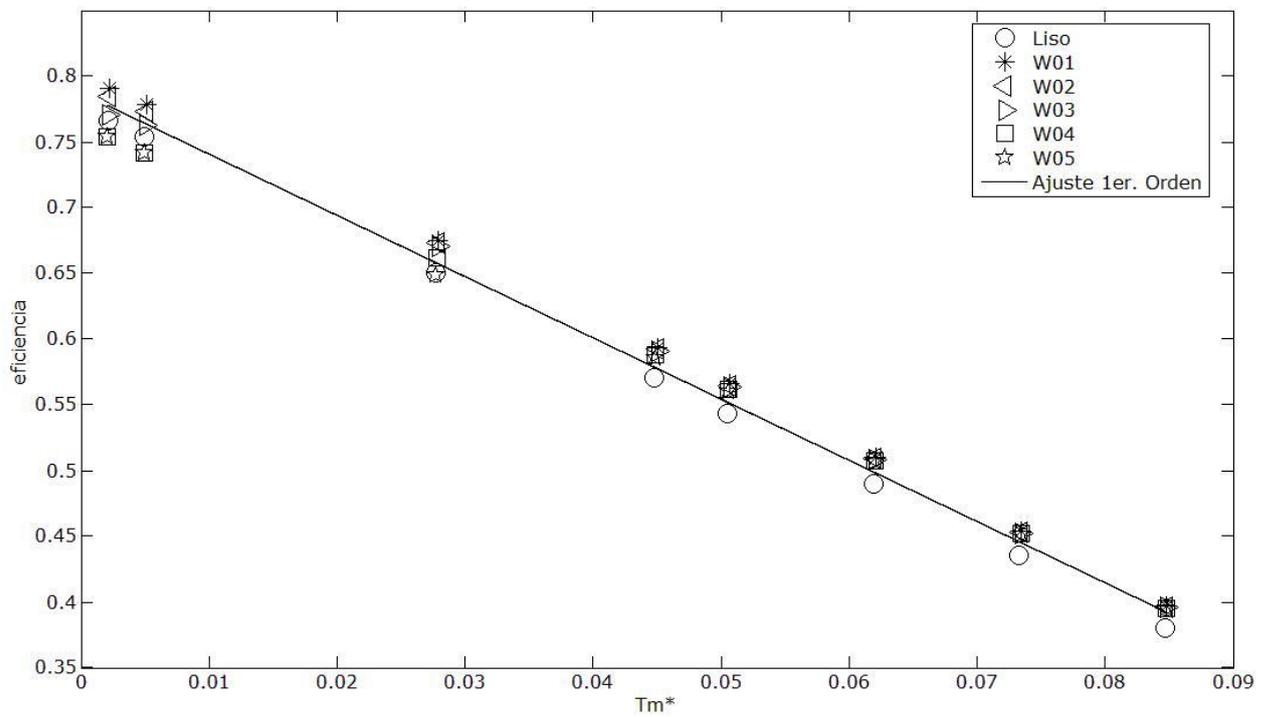
- 5% PPG



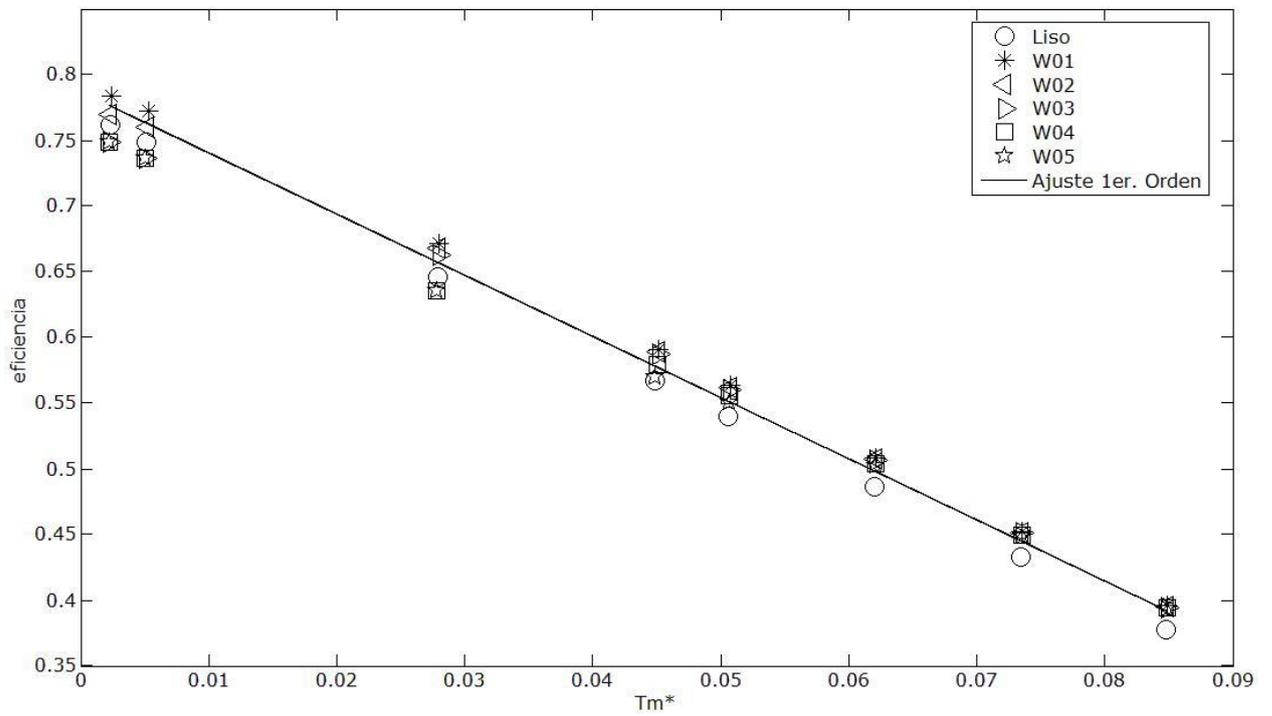
○ 20% PPG



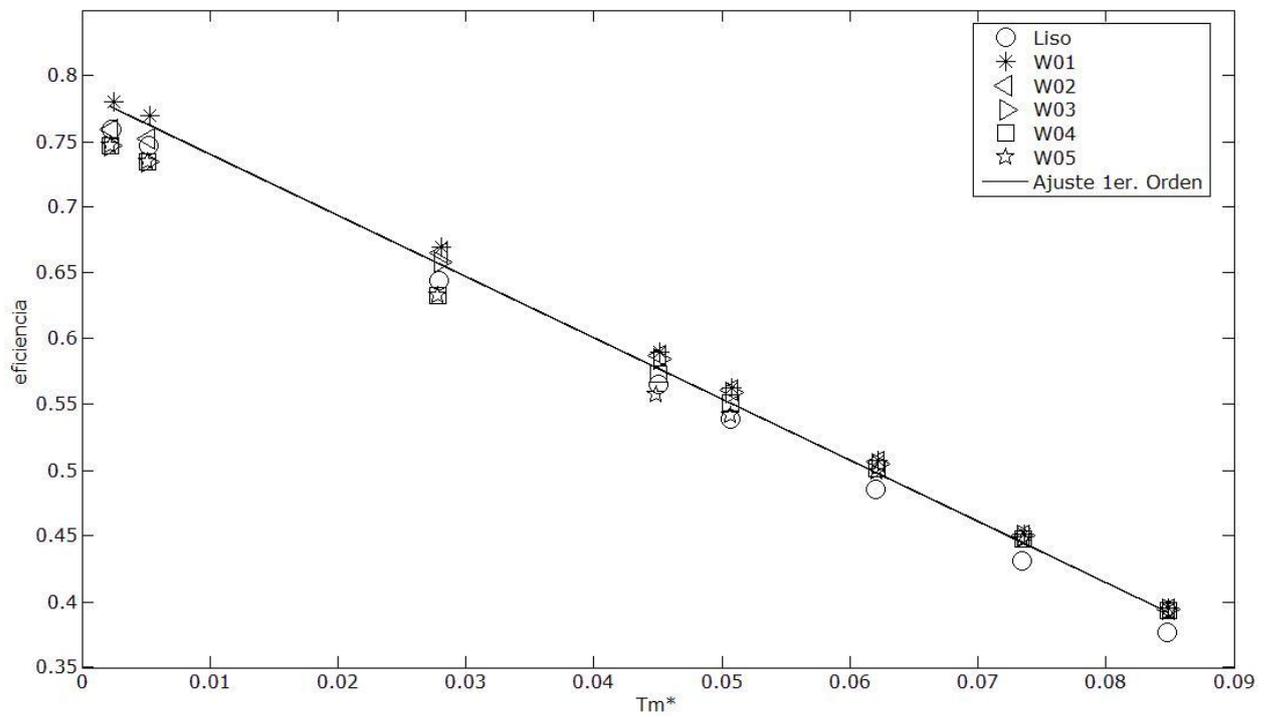
○ 30% PPG



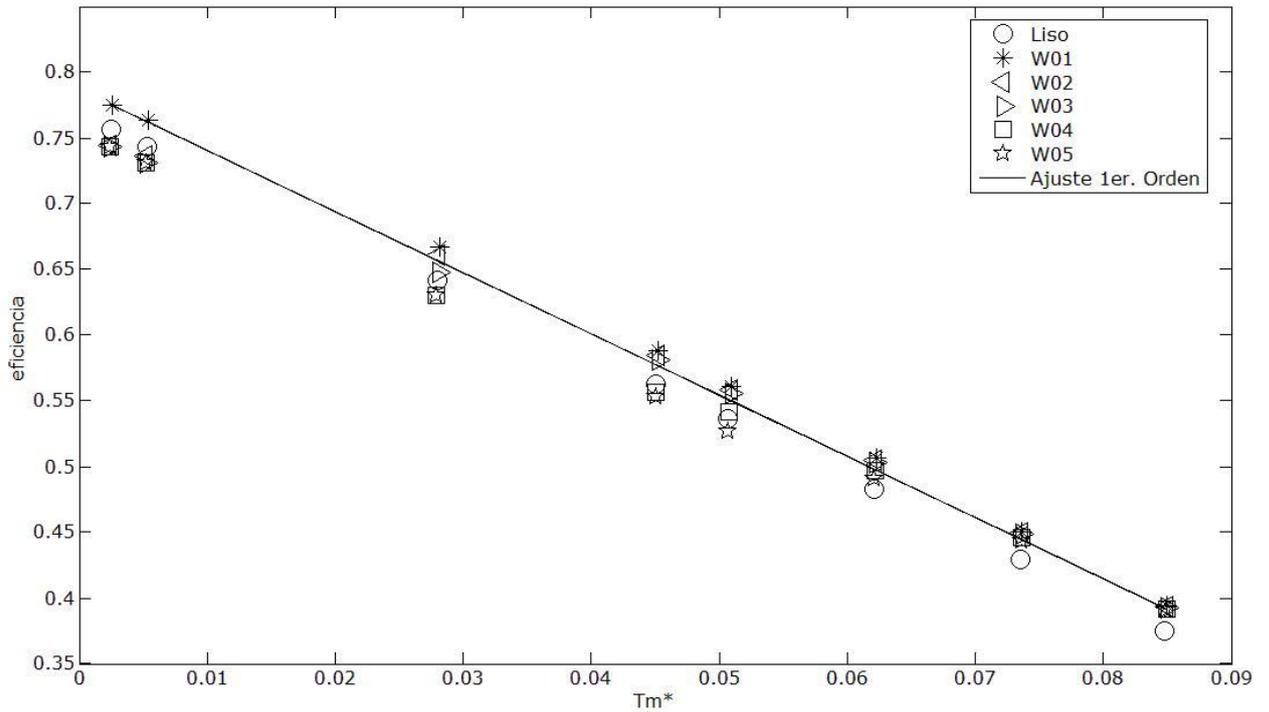
○ 40% PPG



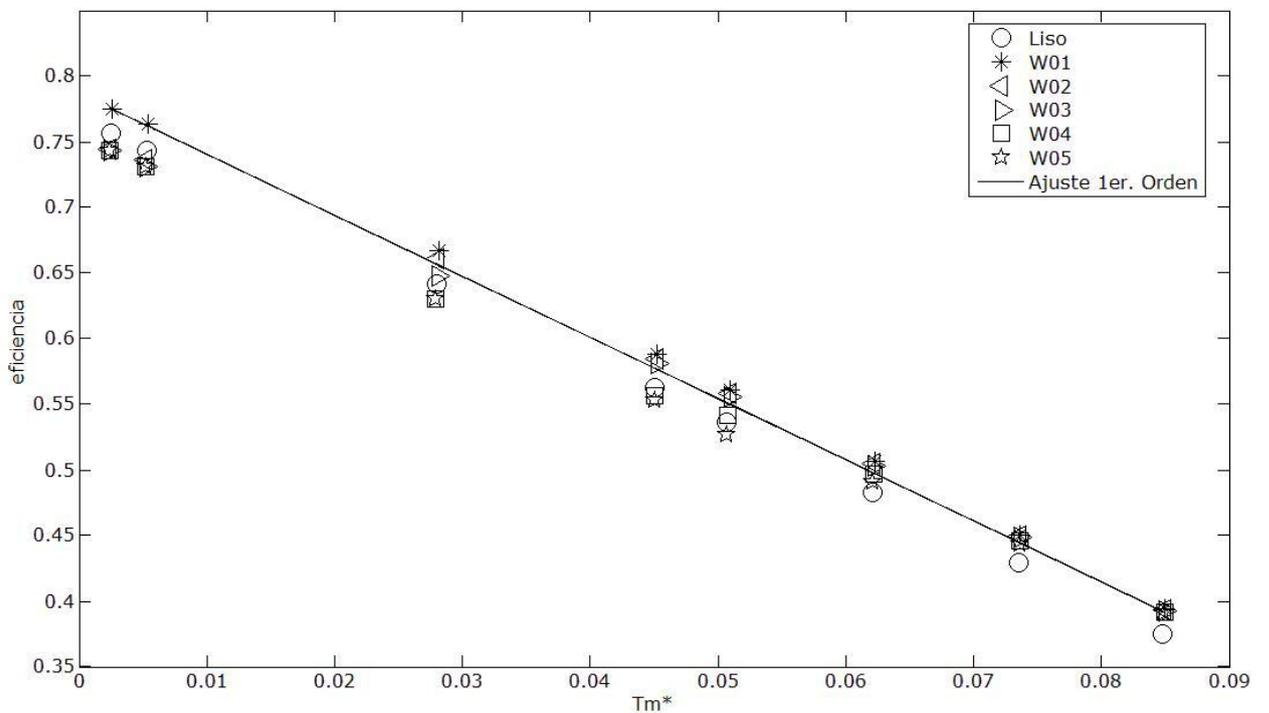
○ 44% PPG



○ 50% PPG

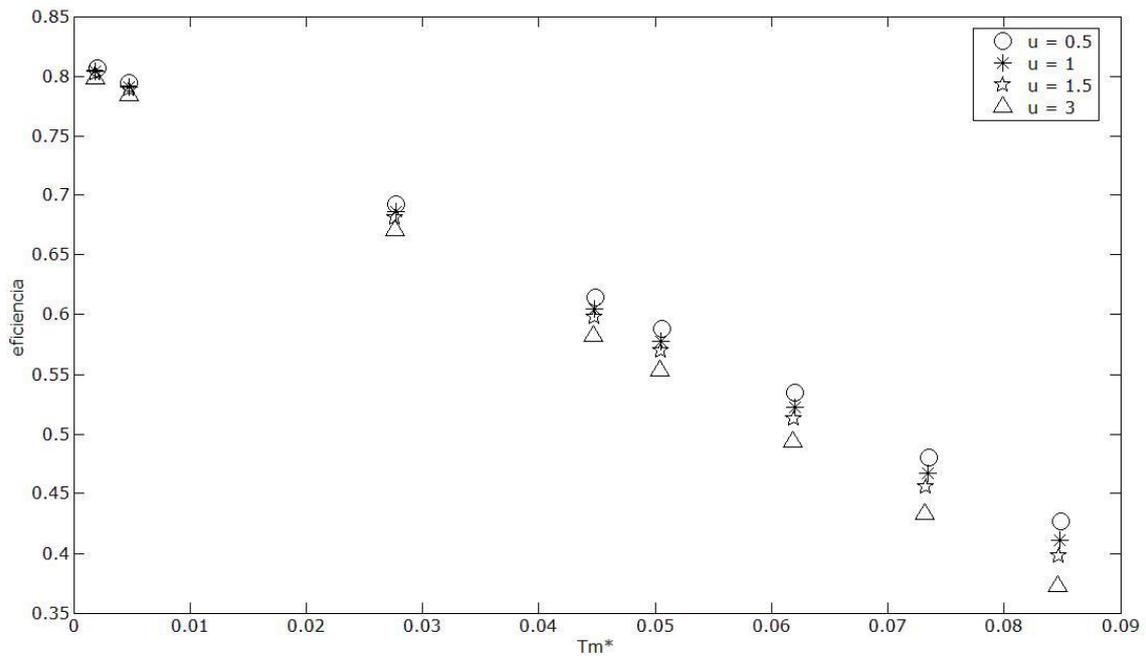


○ 60% PPG

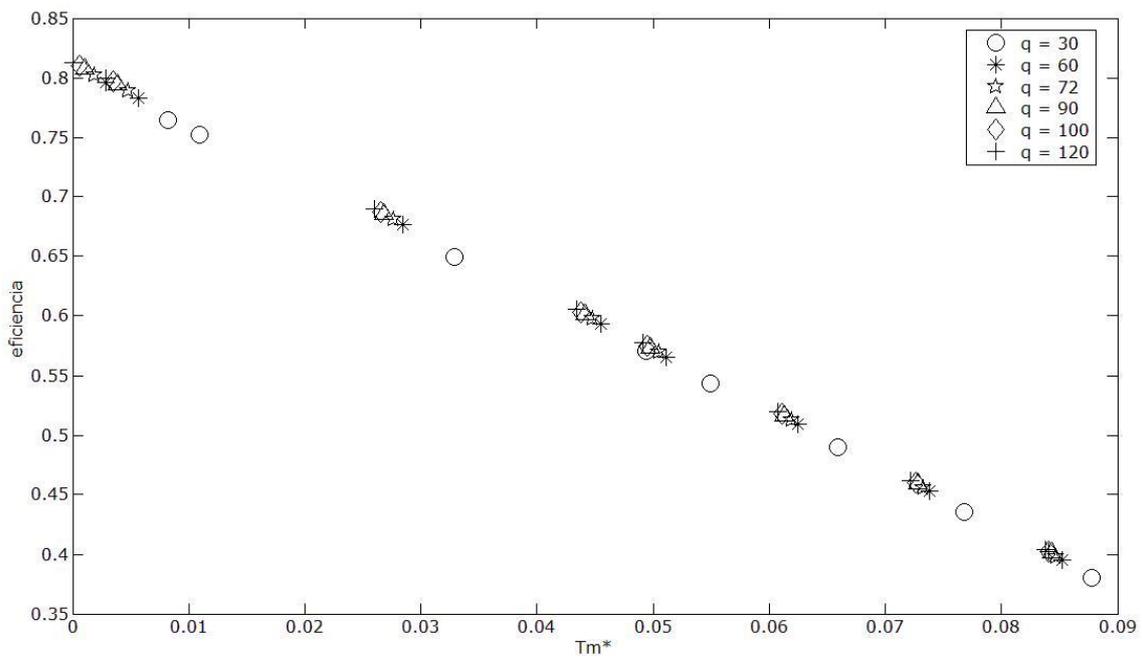


Influencia de las variables de operación en la curva de eficiencia para muelles de distinto paso con $ED = 0,074$

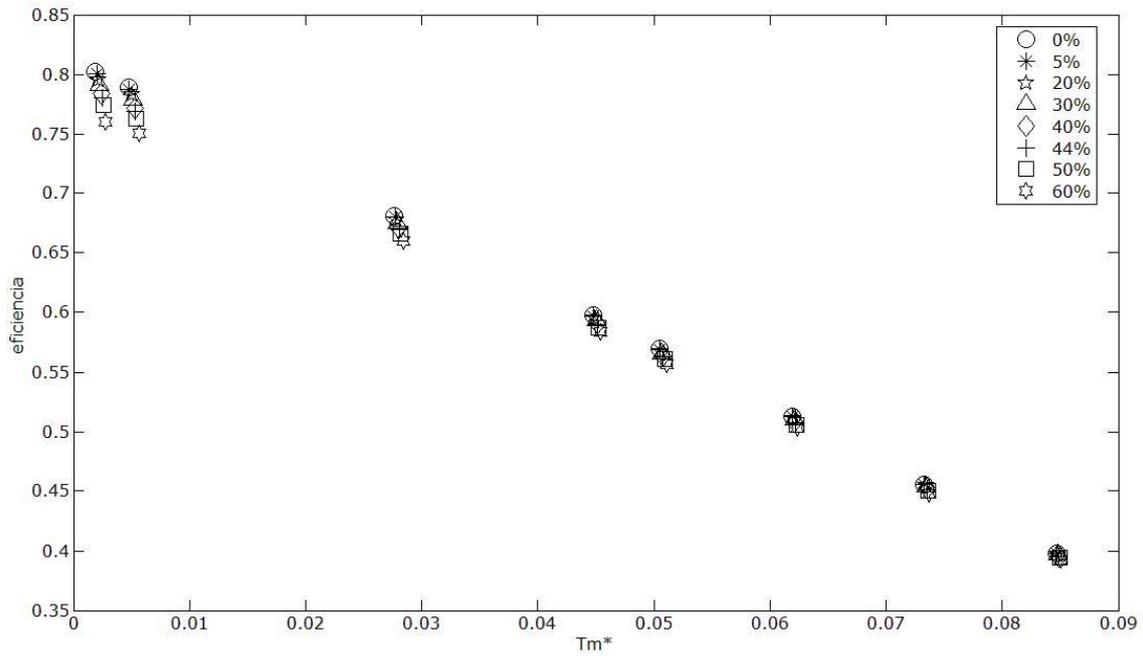
- Muelle M01:
 - Barrido velocidades.



- Barrido caudal.

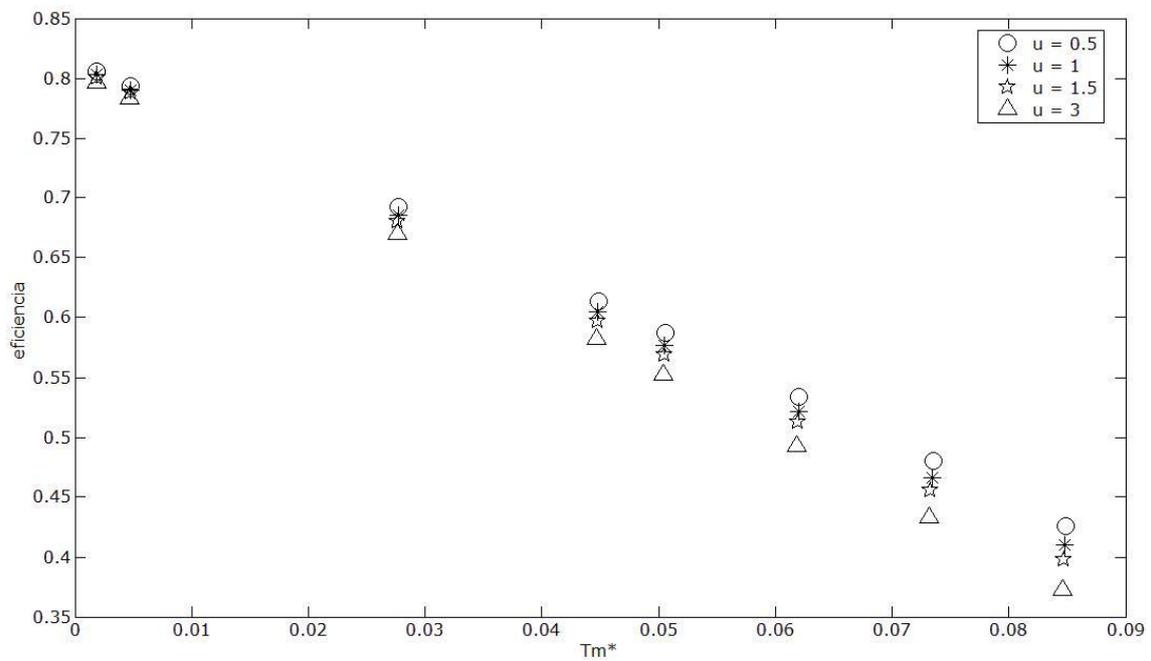


- Barrido concentraciones.

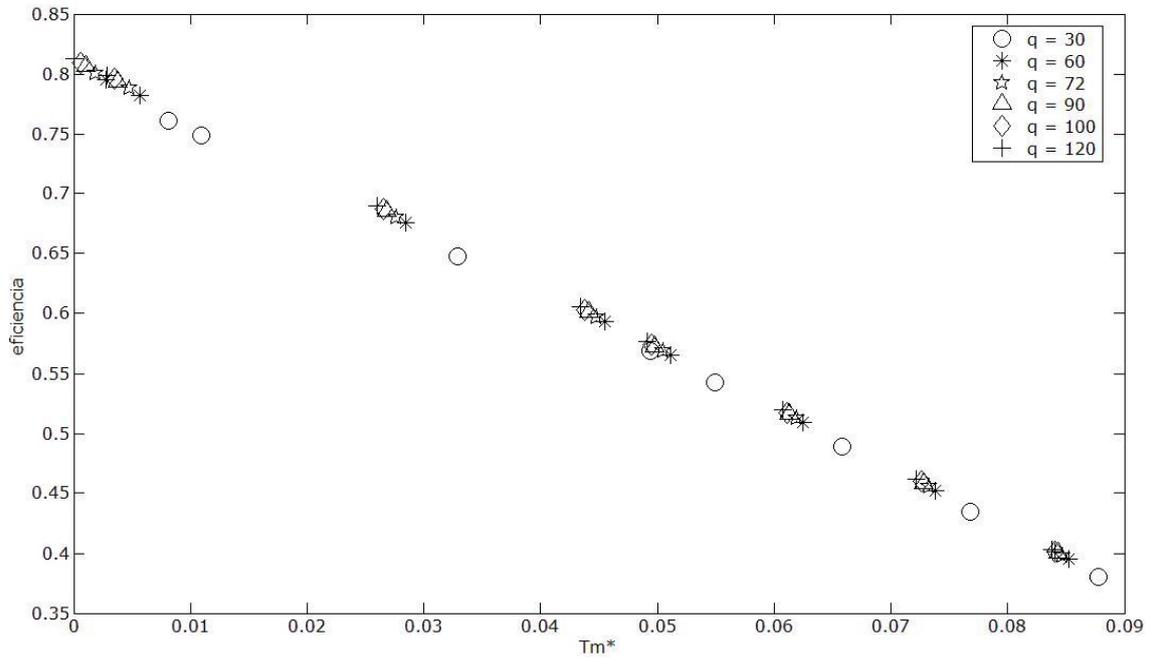


- Muelle M02:

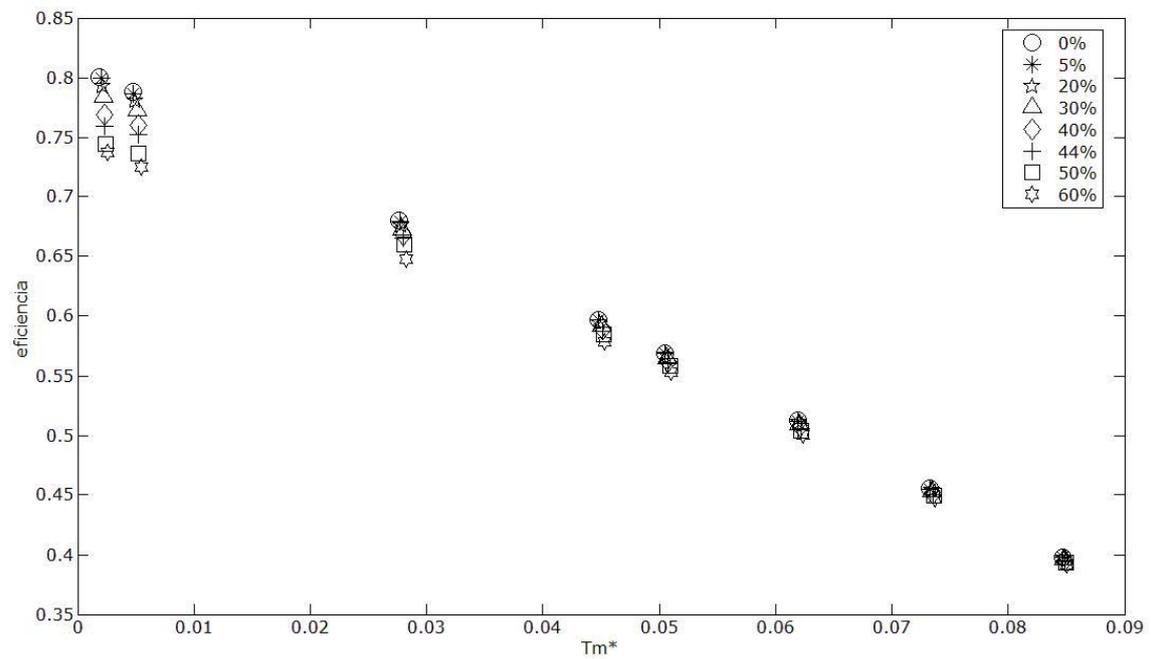
- Barrido velocidades.



○ Barrido caudal.

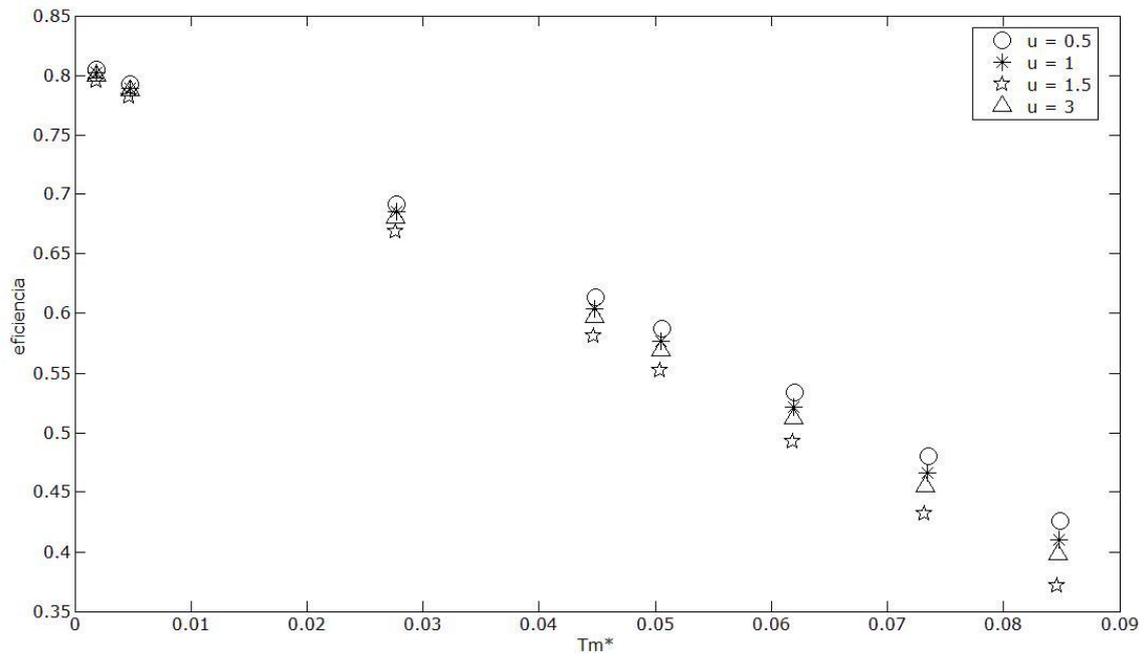


○ Barrido concentraciones.

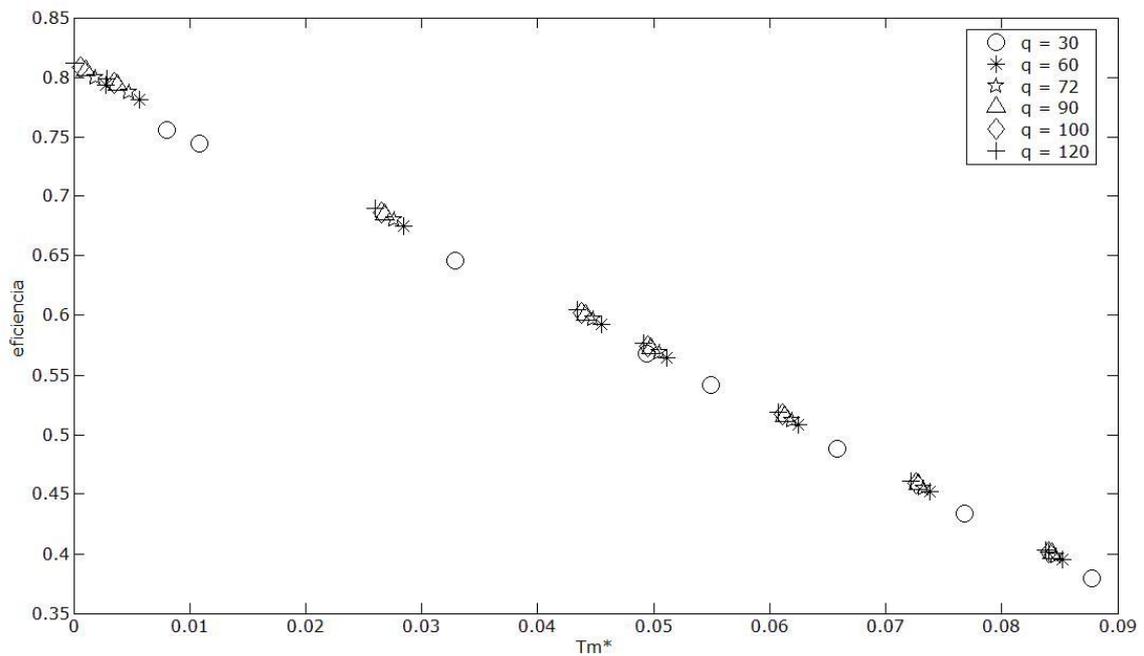


- Muelle M03:

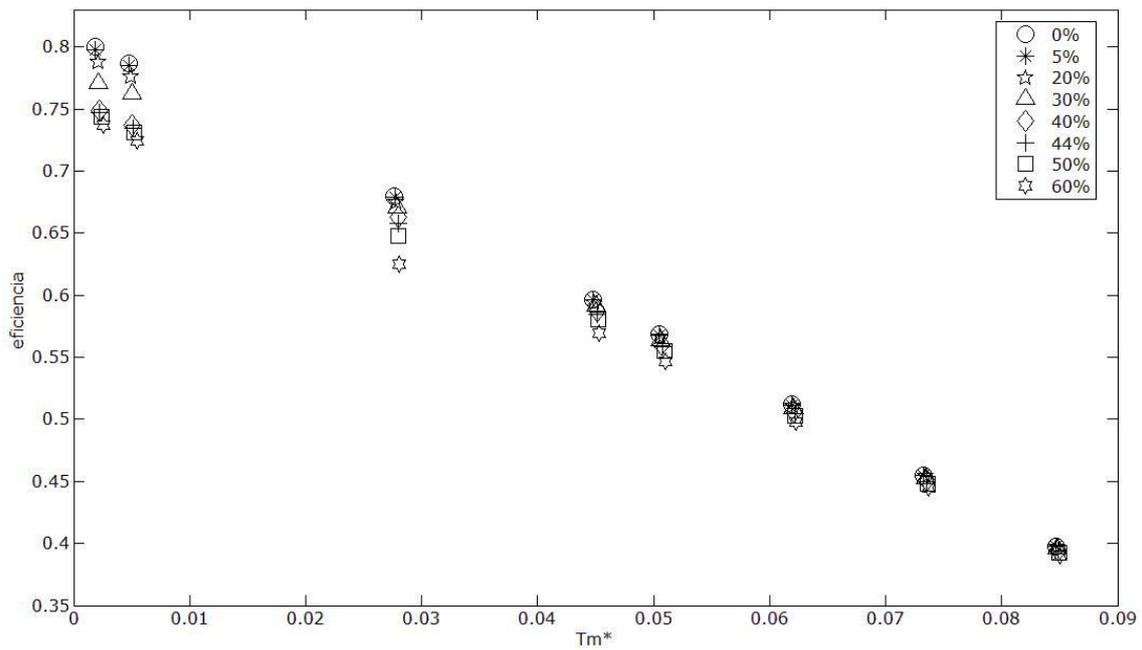
- Barrido velocidades.



- Barrido caudal.

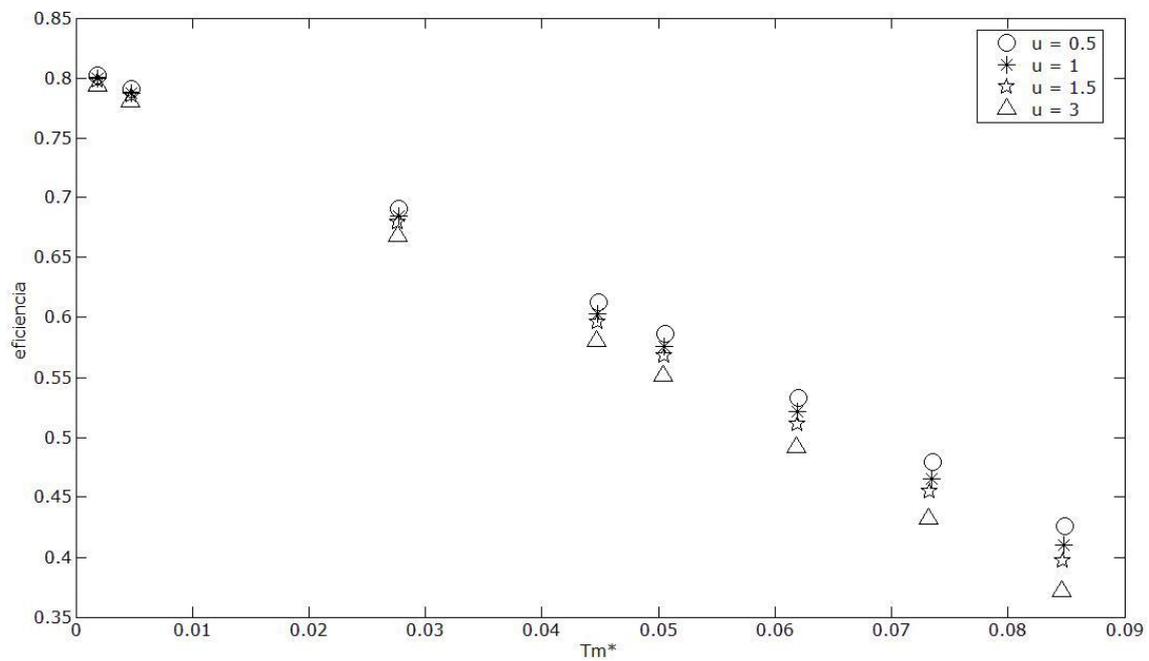


○ Barrido concentraciones.

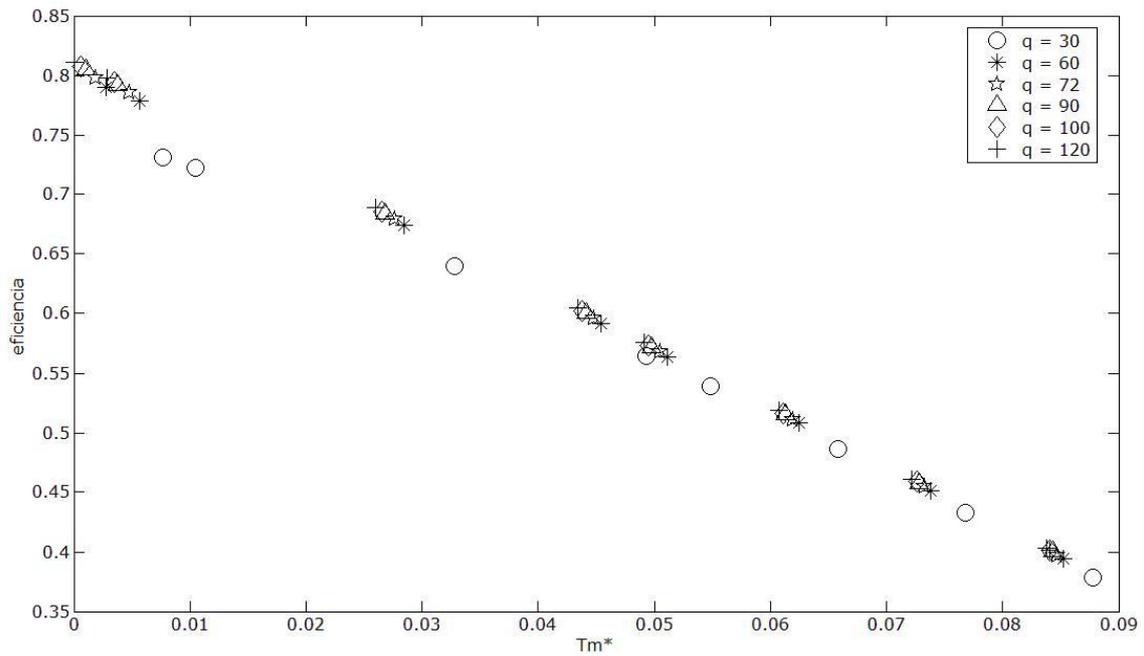


● Muelle M04:

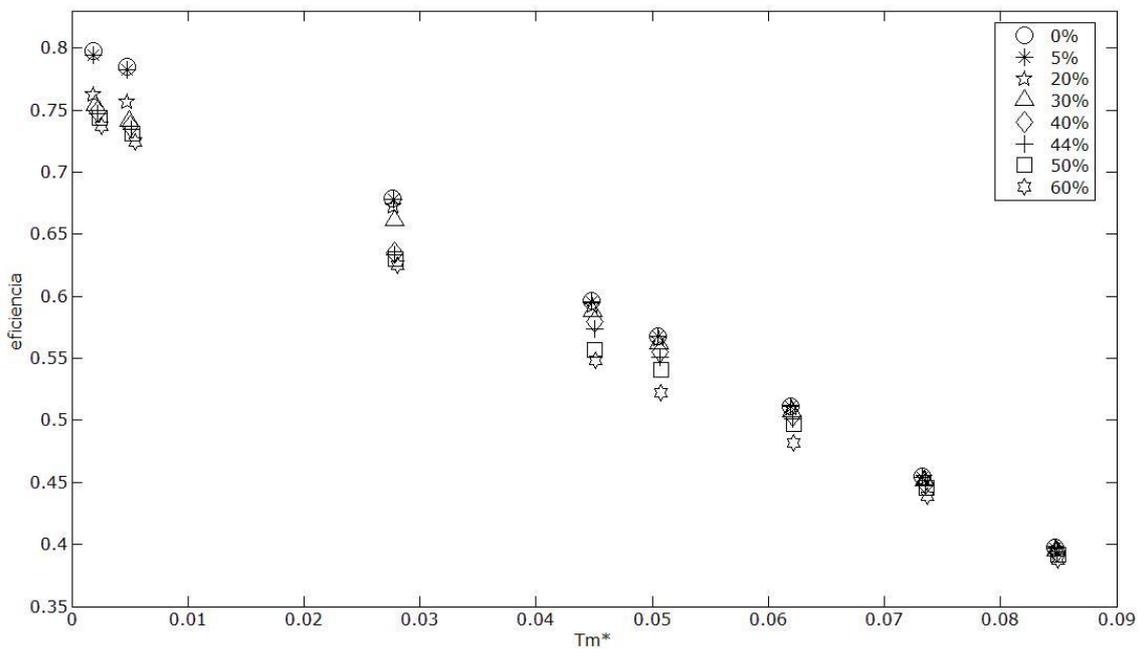
○ Barrido velocidades.



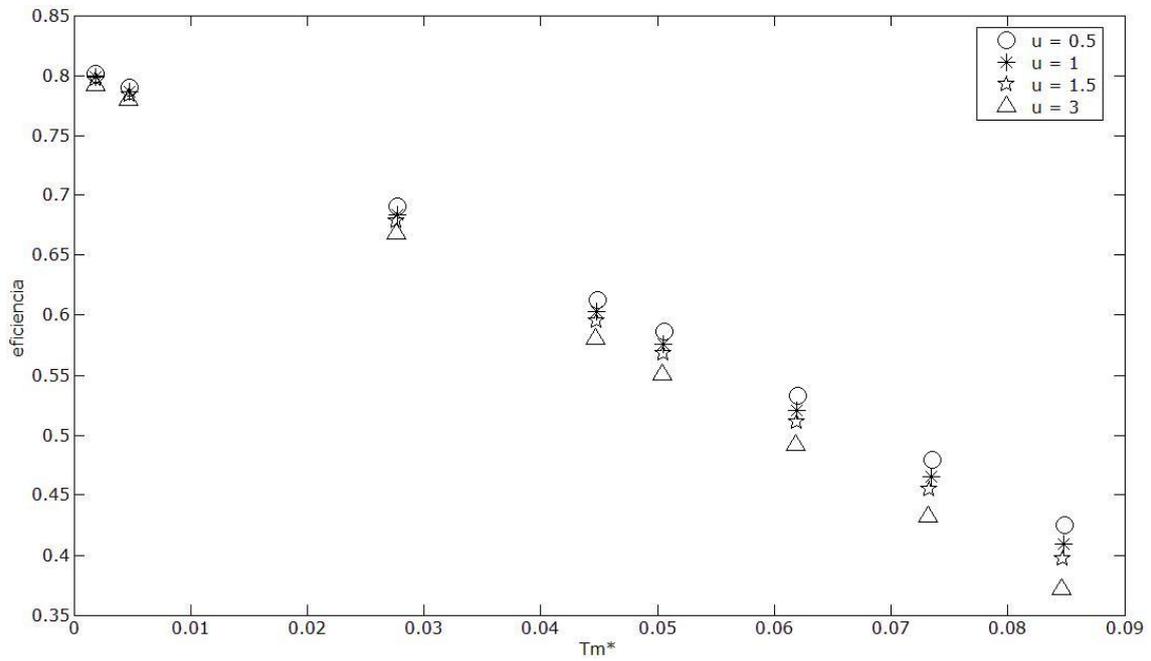
○ Barrido caudal.



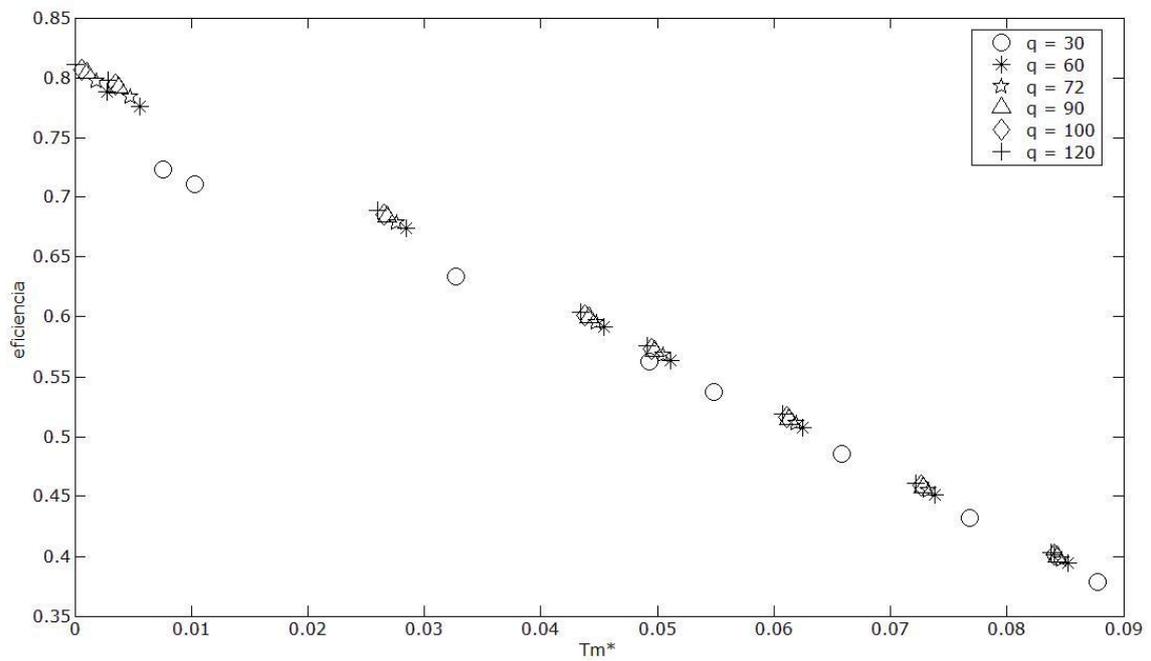
○ Barrido concentraciones.



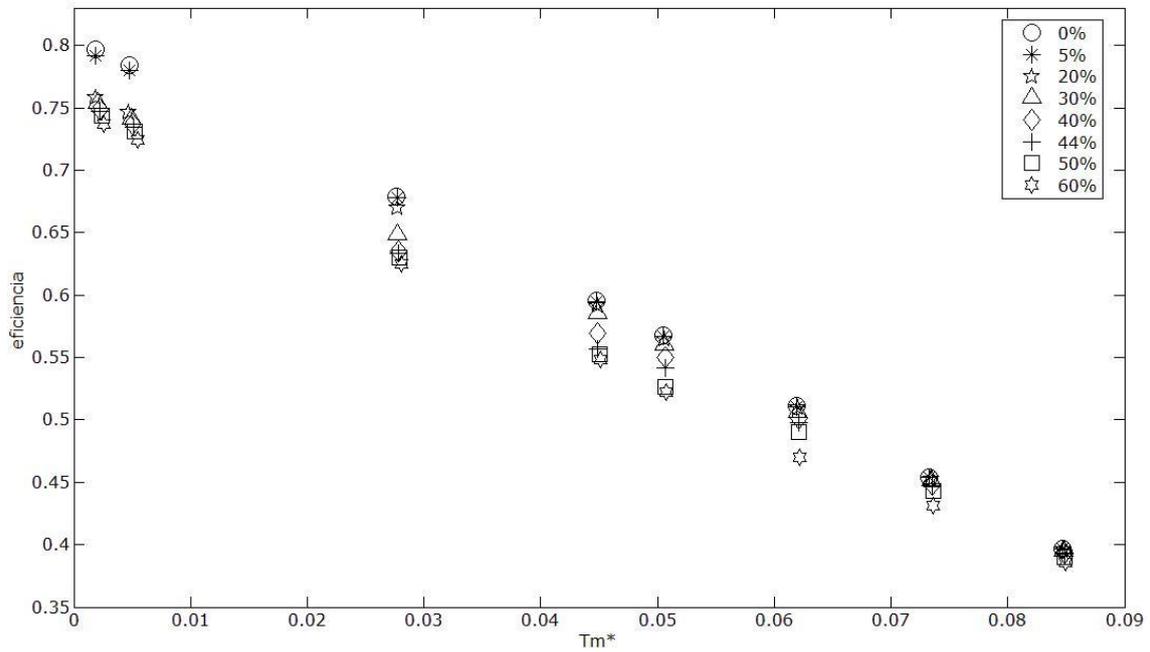
- Muelle M05:
 - Barrido velocidades.



- Barrido caudal.

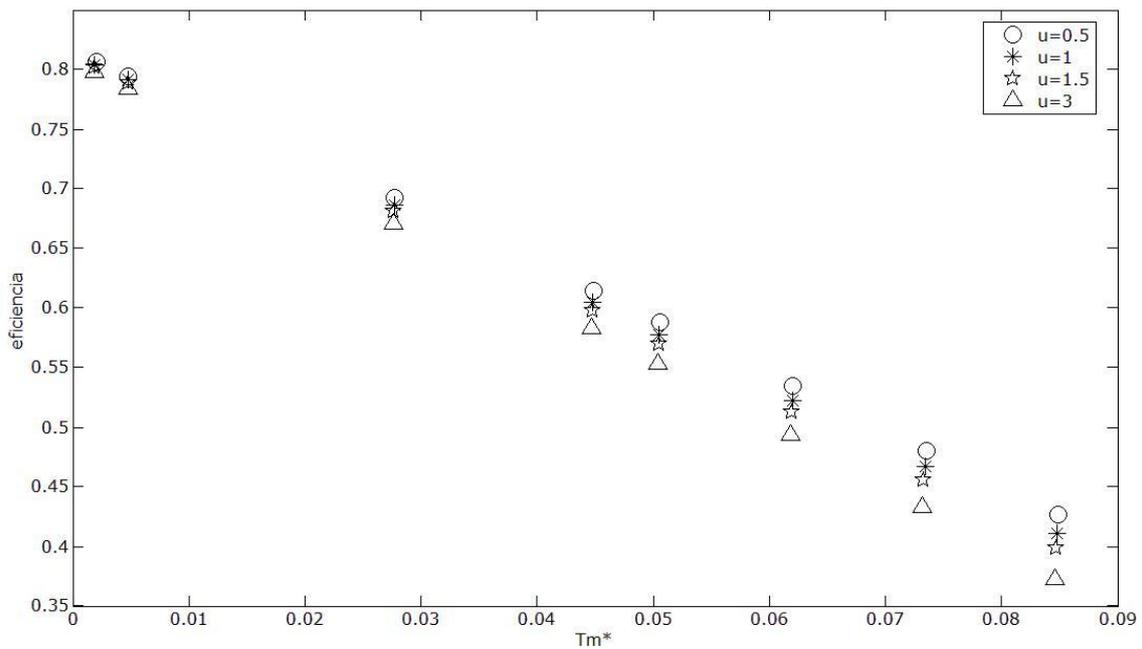


- Barrido concentraciones.

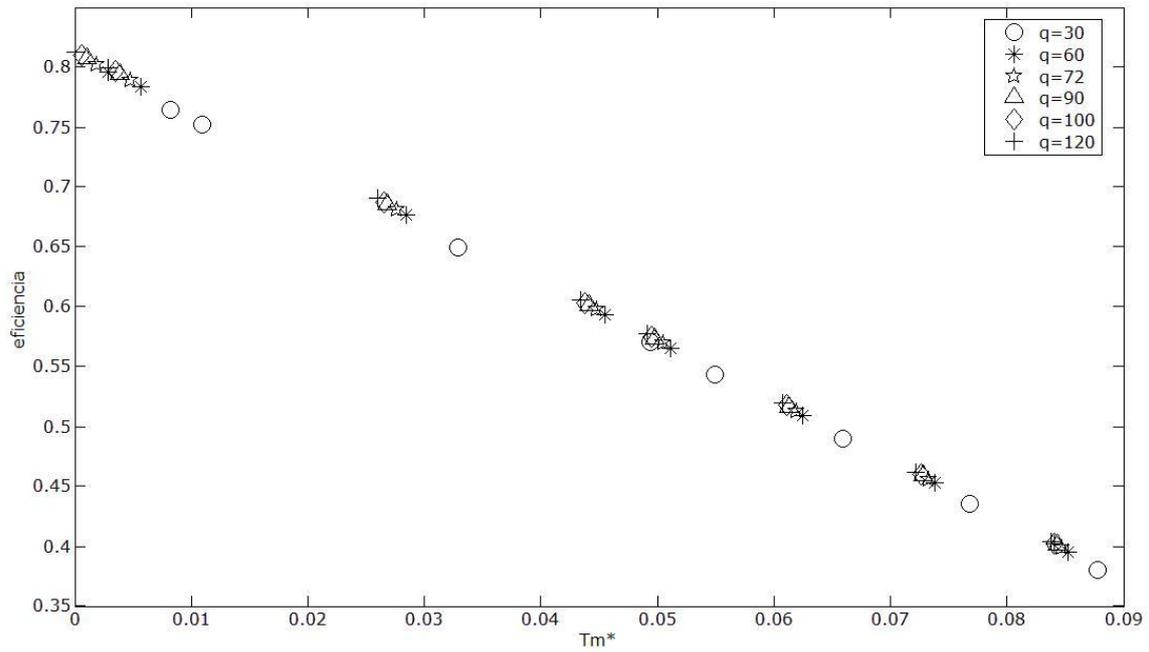


- **Influencia de las variables de operación en la curva de eficiencia para muelles de distinto paso con $ED = 0,1$**
- Muelle W01:

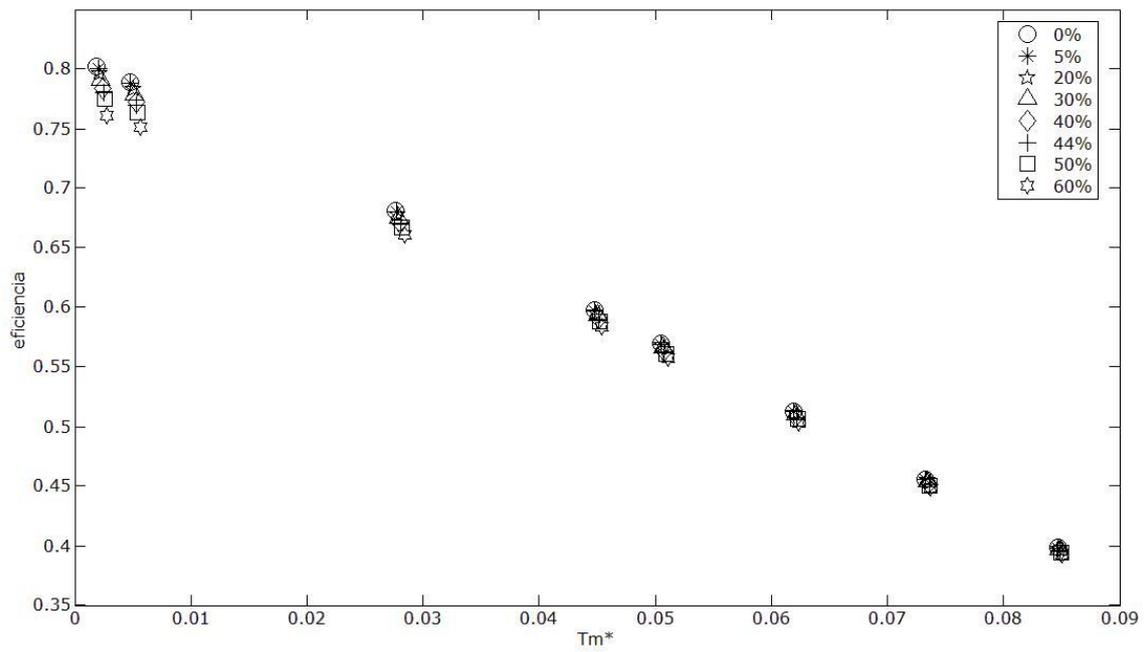
- Barrido velocidades.



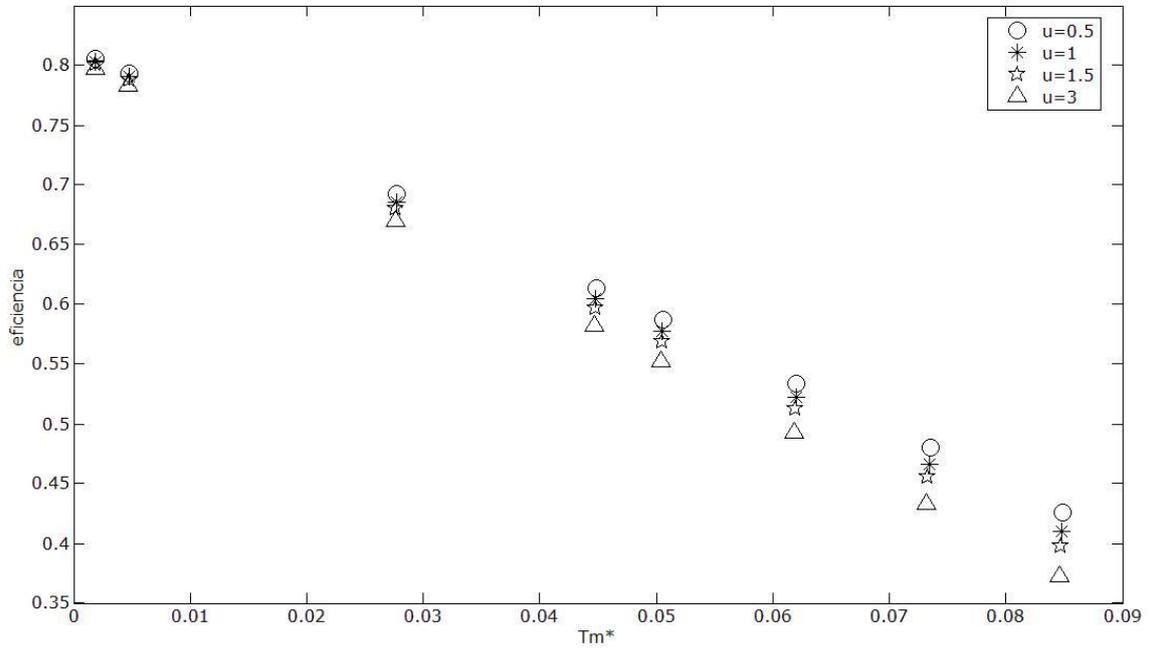
○ Barrido caudal.



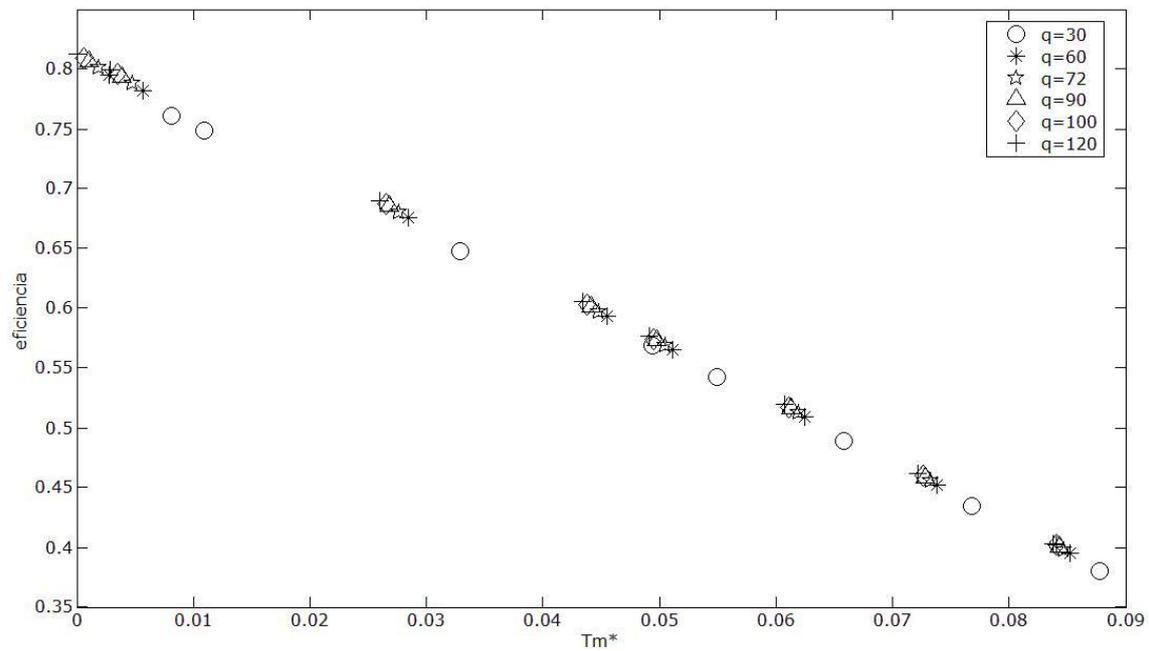
○ Barrido concentraciones.



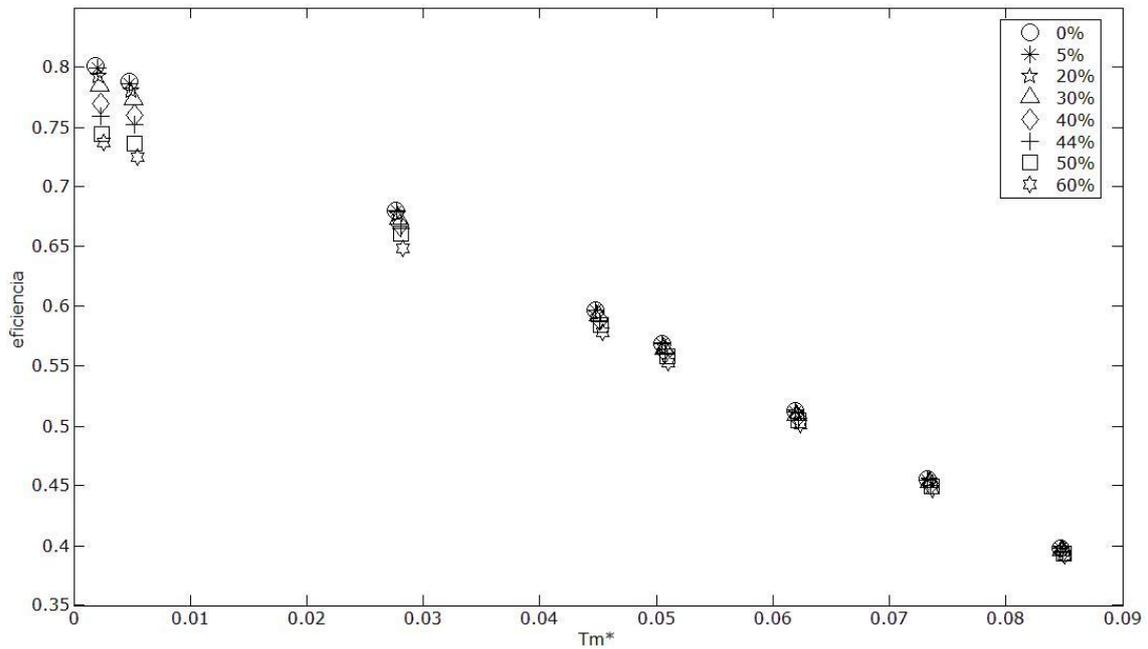
- Muelle W02:
 - Barrido velocidades.



- Barrido caudal.

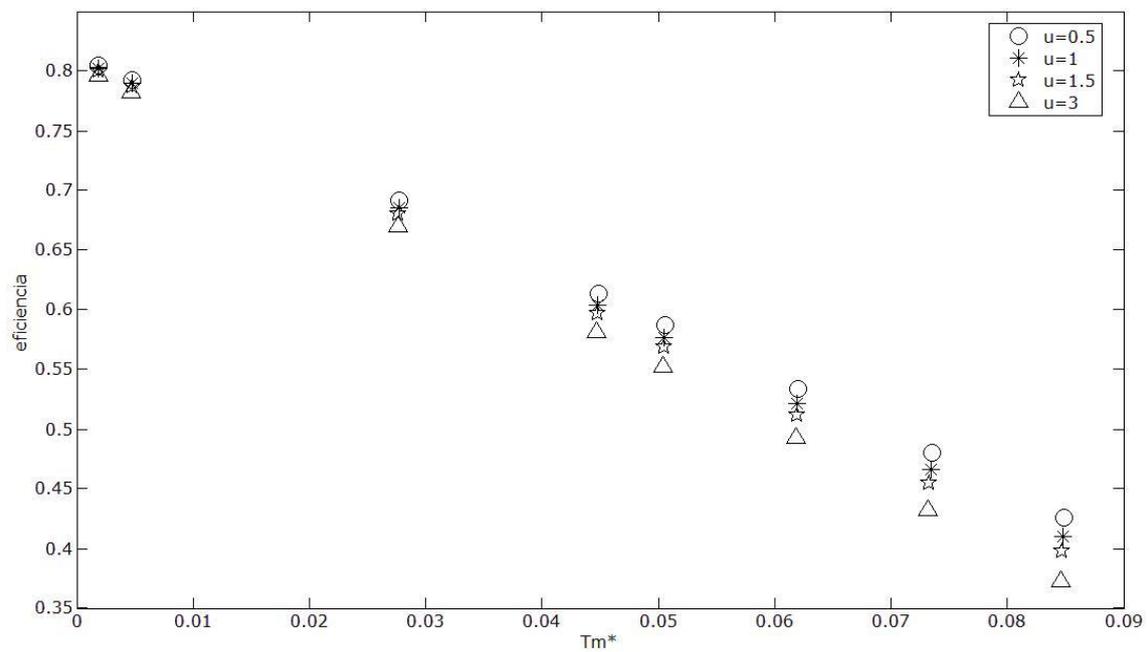


- Barrido concentraciones.

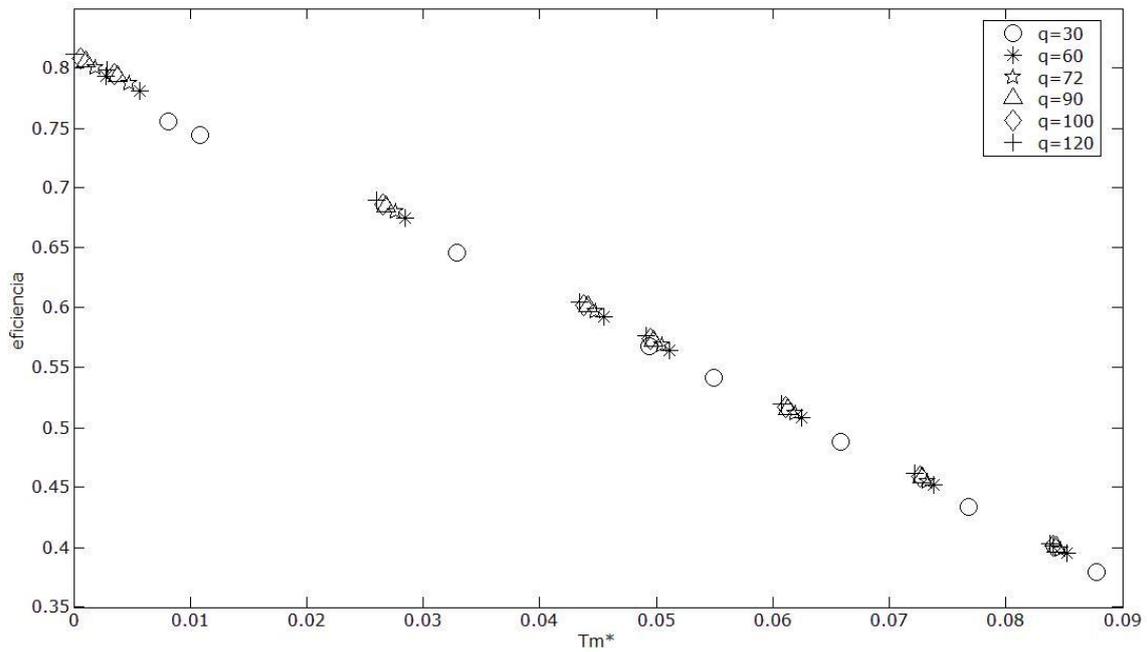


- Muelle W03:

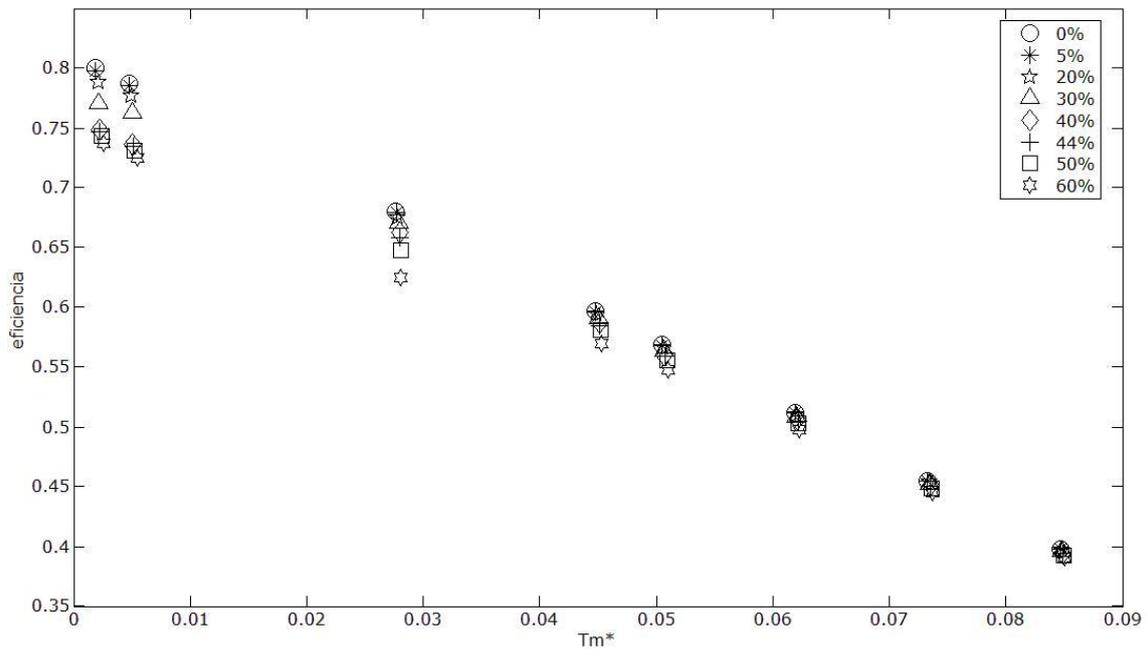
- Barrido velocidades.



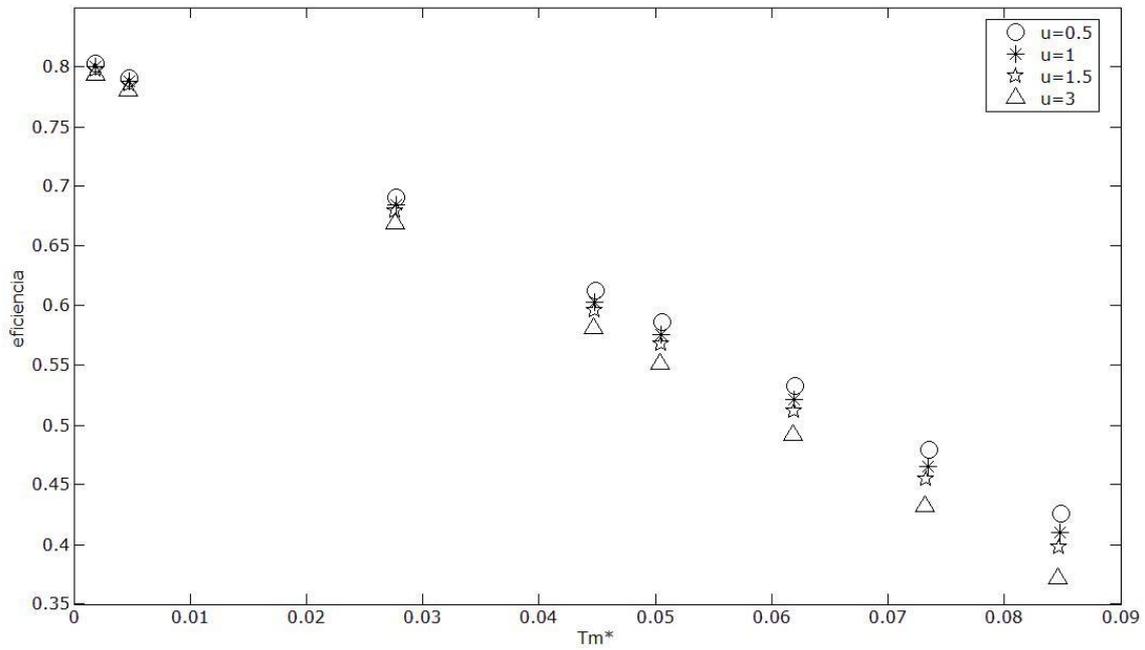
○ Barrido caudal.



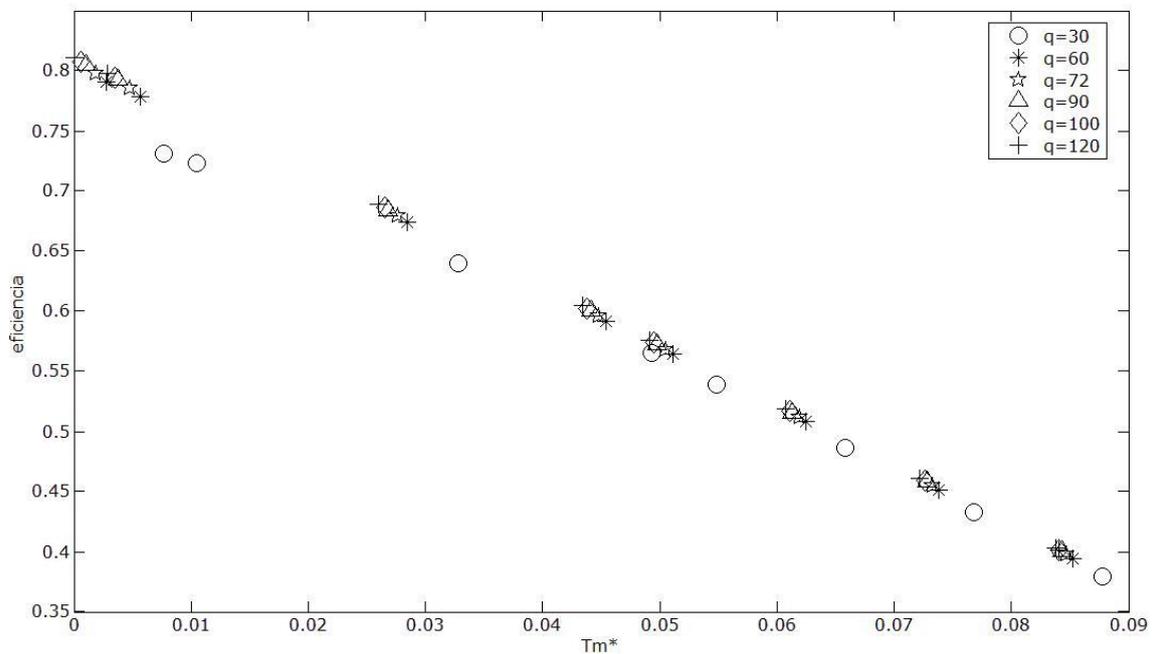
○ Barrido concentraciones.



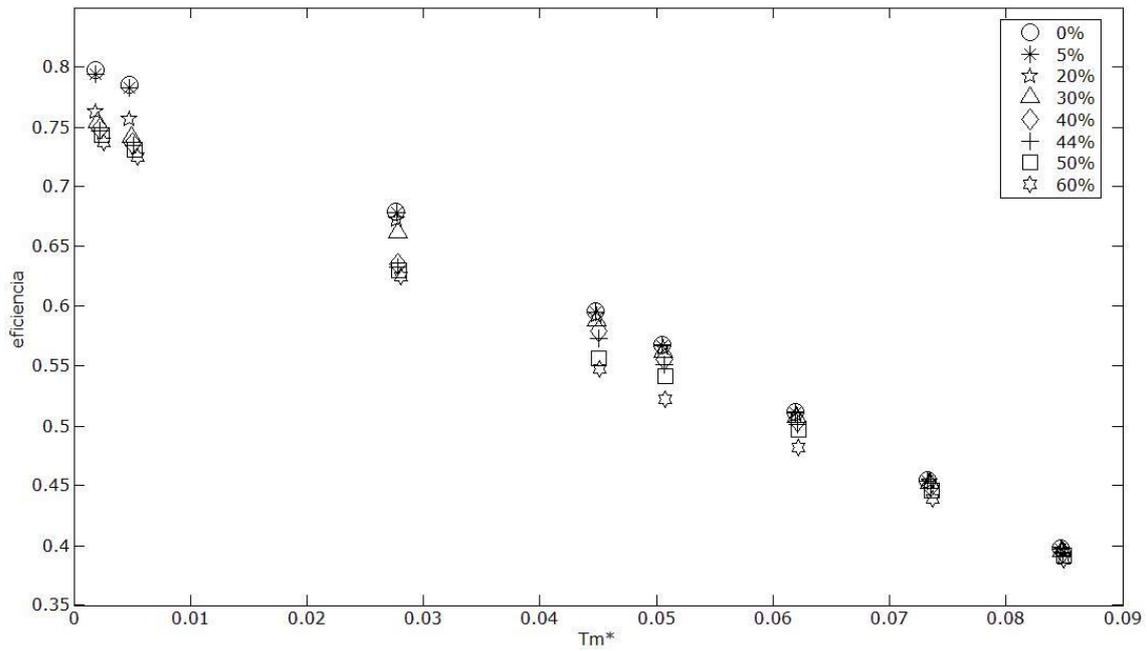
- Muelle W04:
 - Barrido velocidades.



- Barrido caudal.

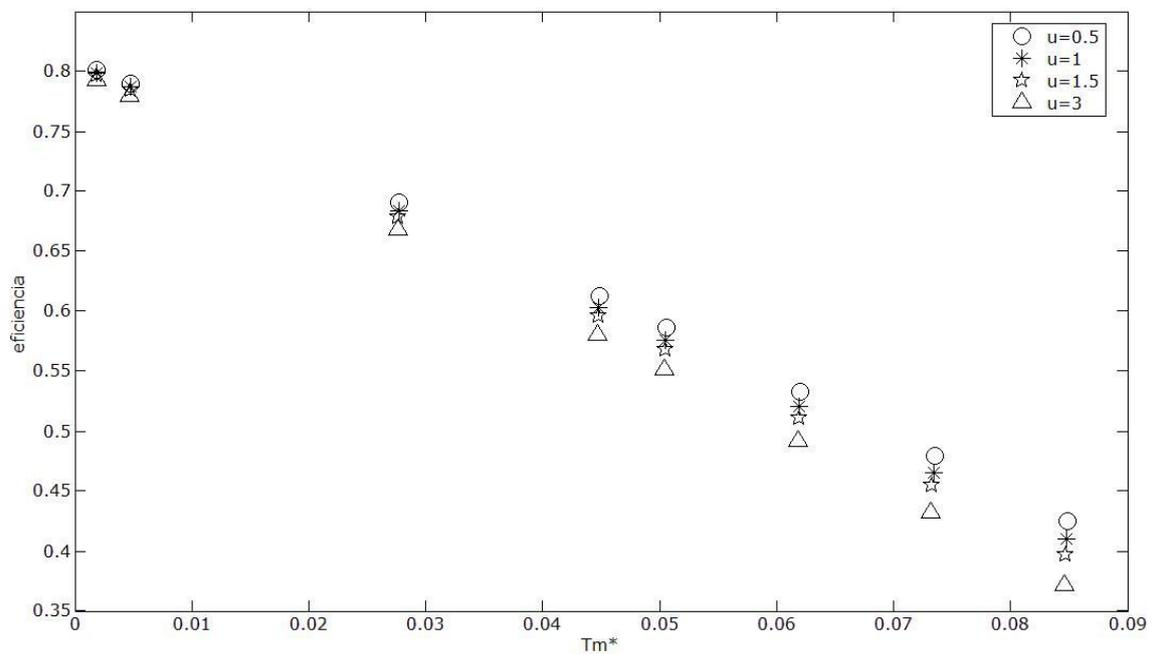


○ Barrido concentraciones.

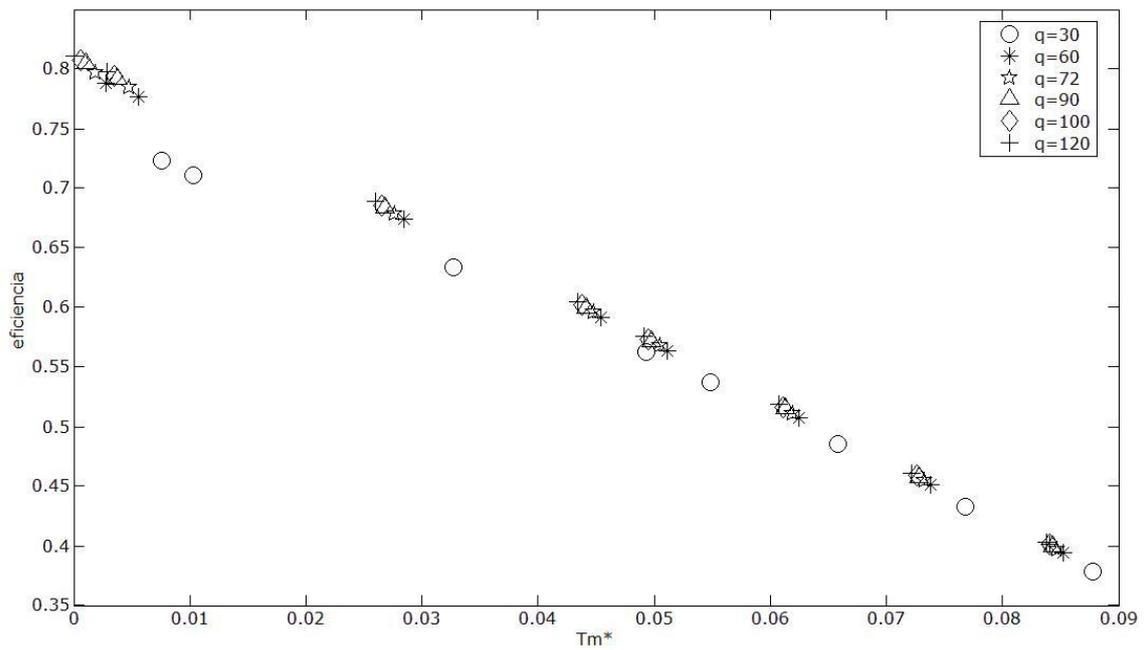


● Muelle W05:

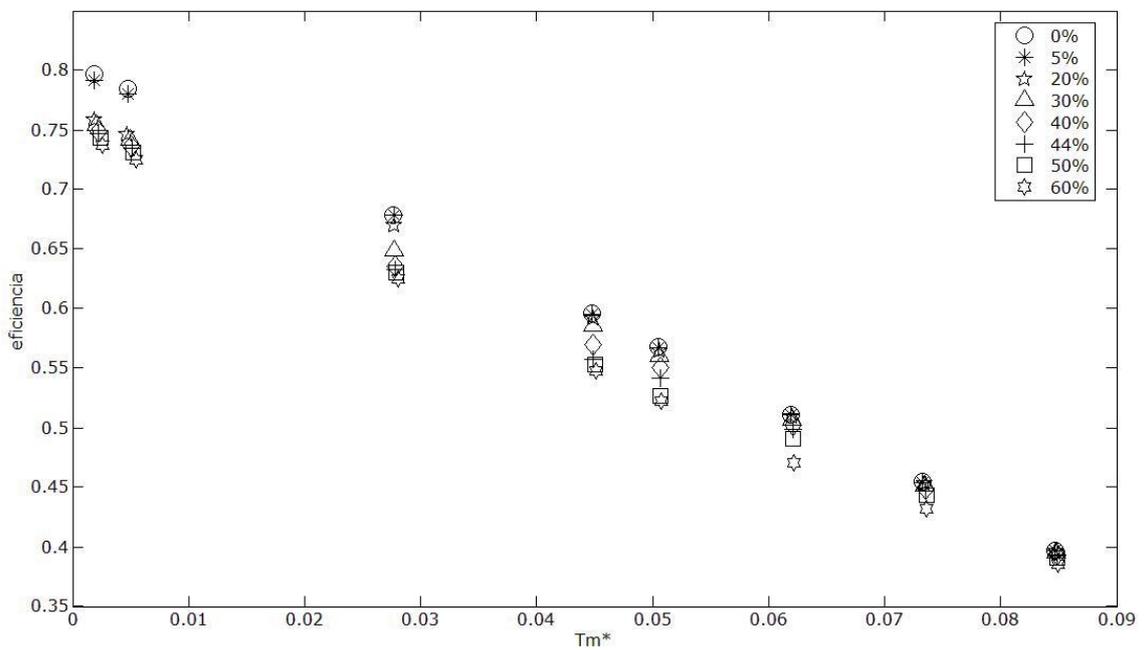
○ Barrido velocidades.



○ Barrido caudal.



○ Barrido concentraciones.



**ANEXO IV:
BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA.**

- [1] AENOR. "*Sistemas solares térmicos y componentes. Parte 2: Métodos de ensayo*". UNE-EN-12975-2: 2006. Madrid, AENOR, 2006.
- [2] Publicación ARGEM INFORMA. Agencia de gestión energética de la Región de Murcia. 2007. Edición digital. Números 24,26 y 36.
- [3] BELMONTE CARTAGENA, C: "*Ensayo de rendimiento de un captador solar plano de Pasanqui, S.L.* Director: LUCAS MIRALLES, M, Universidad Miguel Hernández, Octubre de 2007.
- [4] CENER. "*Cálculo de la función lineal de rendimiento para el captador SOLARIS CP1 de Solaris Energía Solar S.A.*", Año 2008
- [5] COMUNIDAD AUTÓNOMA DE LA REGIÓN DE MURCIA. "*Ley 10/2006 de 21 de Diciembre, de Energías Renovables y ahorro y eficiencia energética de la Región de Murcia*", B.O.R.M. del 3 de Enero de 2007.
- [6] DELGADO, J.P. *Situación energía solar térmica*. [Murcia], Agencia de gestión energética de la Región de Murcia (ARGEM), 2007.
- [7] DOVIC, et al.: "*Estimating heat losses in solar collectors by IR thermography and numerical*", acta del congreso internacional de termografías cuantitativas en IR, Cracovia (Polonia, Julio de 2008).
- [8] DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A.: "*Solar engineering of thermal processes*" (3ª ed.). University of Wisconsin-Madison: John Wiley & Sons, INC, Año 2006.
- [9] ÉCIJA, J. J.: *Trabajo Académicamente Dirigido: "Colectores solares"*. Universidad Politécnica de Cartagena, Año 2009.
- [10] EISENMANN, W. et al: "*On the correlations between collector efficiency factor and material content of parallel flow flat-plate solar collectors*". Universidad de Marburg, Octubre 2003.
- [11] ESPAÑA. "*Real Decreto 314/2006 del 17 de marzo, por el que se establece el Código Técnico de la Edificación*", Boletín Oficial del Estado, 28 de Mayo de 2006, nº 74.

- [12] GARCÍA PINAR, A. *Mejora de la transmisión de calor en tubos circulares lisos mediante inserción de muelles en espiral*. Directores: VIEDMA ROBLES, A. y VICENTE QUILÉS, P.G. Universidad Politécnica de Cartagena, Departamento de ingeniería térmica y de fluidos, Julio 2006.
- [13] GNIELINSKI, V. (1975). "Neue Gleichungen für den Wärme- und den Stoffübergang in turbulent durchströmten Rohren und Kanälen. *Forschung im Ingenieurwesen*", 41, 8-16, Año 1975.
- [14] HOBBI, ALIREZA: "Design of solar water heating systems for cold climate and study of heat transfer enhancement devices in flat plate solar collectors". Director: Dr. Kamran Siddiqui, Concordia University (Montreal). Departamento de Ingeniería industrial y mecánica, Marzo de 2007.
- [15] INCROPERA, Frank. et al: "Fundamentos de transferencia de calor", 4ª edición, México, Prentice Hall Hispanoamericana, 1999.
- [16] JAISANKAR, S. et al: "Experimental studies of heat transfer and friction factor characteristics of thermosyphon solar water heater system fitted with spacer at the trailing edge of twisted tapes". Applied Thermal Engineering 29 pags. 1224-1231, Julio 2007 (fecha recepción del artículo).
- [17] JAISANKAR, S: "Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of thermosyphon solar water heater with kenics twisted tapes", acta de congreso nacional de energias renovables, India 2008.
- [18] KLEIN, S. A.: "Calculations of Flat-Plate Loss Coefficients. Solar energy" , 17, 79, Año 1975.
- [19] KLEIN, S. A., DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A. " Transient Considerations of Flat-Plate Solar Collectors. *Trans. ASME, J. Engrg. for Power*", (pág. 109). Año 1974
- [20] KUMAR, A. PRASAD, B. N: "Investigation of twisted tape inserted solar water heaters, heat transfer, friction factor and thermal performance results" Renewable Energy, Vol. 19, pags. 379-398, año 2000.

- [21] LAMBERT, A.A. et al: "*Enhanced heat transfer using oscillatory flows in solar collectors*", 2004, México.
- [22] LILLO, I., LÓPEZ G, et al. "*Instalaciones solares térmicas*". Ed: Solaprxaxis Ag. ISBN 3-934595-30-8.
- [23] LÓPEZ GALIANA, E. *Trabajo Académicamente Dirigido: "Ensayo de Rendimiento Térmico para Captadores Solares mediante simulación con TRNSYS"*. Departamento de Ingeniería térmica y de Fluidos, Universidad Politécnica de Cartagena, Julio 2009.
- [24] LÓPEZ GALIANA, E.: "*Simulación mediante TRNSYS de un banco de ensayos de colectores solares térmicos. Implementación de nuevos componentes*". Directores: HERRERO MARTÍN, R. y PÉREZ GARCÍA J. Universidad Politécnica de Cartagena, Departamento de ingeniería térmica y de fluidos, Septiembre 2009.
- [25] MADRID GARCÍA, N.: "*Transmisión del calor*". Servicio de publicaciones de la UPCT, año 2008. Departamento de física aplicada, UPCT.
- [26] NASRI, J et al. "*Enhancing solar energy collector by using curved flow technology completed with flow in porous media: an experimental study*". Departamento de ingeniería mecánica, Universidad de Ammán (Jordania), 2002.
- [27] OWEN, M.S, KENNEDY, H.E: "*ASHRAE handbook of fundamentals*", capítulo 31: "*physical properties of secondary coolants (brines)*", 2009
- [28] PUCAR, M. et al: "*The effect of diffuse/indirect light on the energy gain of solar thermal collectors*", Instituto para la arquitectura y urbanismo de Serbia, (Belgrado, 2004).
- [29] SODEAN, S.A. *Especificaciones técnicas de diseño y montaje de instalaciones solares térmicas para producción de ACS y las modificaciones de aplicación en el programa Prosol*. 3ª edición. 28/07/04. D-P0751E-17
- [30] VARUN et al: "*A review on roughness geometry used in solar air heaters*", Departamento de ingeniería mecánica. Instituto tecnológico de Moradabad (India), 2006.

- [31] VERA. F. et al. *"Atlas de irradiación solar y temperatura ambiente en la comunidad autónoma de la Región de Murcia"*. Departamento de ingeniería térmica y de fluidos de la Universidad Politécnica de Cartagena. Año 2008.
- [32] VILLA ORTIZ, A: *"Desarrollo de nuevos componentes de colectores de parrilla y serpentín con TRNSYS para evaluar la mejora de colectores solares planos mediante muelles en espiral"*. Director: GARCÍA PINAR, A., Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos, Universidad Politécnica de Cartagena, Septiembre de 2010
- [33] Fuentes web consultadas:
- <http://www.portalsolar.com> [Consulta: 18 de febrero de 2009].
 - <http://www.solclima.com> [Consulta: 18 de febrero de 2009].
 - http://www.registrocdt.cl/fichas%20especificas/listado_fichas/fichas/c08/INGESOLAR_sistemas_captacion_energia_solar/index.htm [Consulta: 16 de abril de 2009]
 - www.carm.es [Consulta: 10 de septiembre de 2011]
 - www.argem.es [Consultas entre abril y junio de 2009]