

Análisis del comportamiento de un PTA.

Lorenzo Castro

Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas
Escuela Técnica Superior de Ingeniería-ICAI

Resumen:

El presente artículo trata de realizar un análisis del funcionamiento y comportamiento del Paramento Transparente Activo termoelectrico mediante un primer estudio teórico y posteriormente, un estudio de comportamiento real en un prototipo construido para tal efecto. También se introducirán los principios de ensayo utilizados en el análisis del comportamiento de células Peltier y se tratará de aplicar esta filosofía al caso en estudio, adaptando el método a las características específicas del elemento. Tras realizar lo comentado anteriormente se compararán los aspectos prácticos y teóricos enfocados al prototipo para estimar cuanto se aleja el modelo de la realidad y así poder realizar las modificaciones oportunas en el diseño o la fabricación del prototipo que permitan mejorar las actuaciones.

Introducción:

El Paramento Transparente Activo (PTA) se trata de una bomba de calor basada en la termoelectricidad, en concreto en el efecto Peltier. Como cualquier bomba de calor toma calor de un foco frío y lo cede a un foco caliente consumiendo un trabajo. Para realizar esta acción las bombas de calor termoelectricas utilizan las propiedades de algunos materiales termoelectricos, los semiconductores que al paso de una corriente eléctrica continua tiene la propiedad de absorción y generación de calor en la unión entre ellos. La novedad de esta bomba de calor termoelectrica es su aplicación y su ubicación en el entorno. La bomba de calor estará dirigida a la climatización de habitaciones con distintas necesidades térmicas, ya que el bombeo de calor es reversible, simplemente cambiando el sentido de la corriente. Estará posicionada en muro traslúcido o transparente que separa dos entornos (uno exterior y otro interior), para el bombeo de calor solo hará falta colocar la bomba entre dos superficies de cristal o de distintos materiales transparentes.

Célula Peltier comercial:

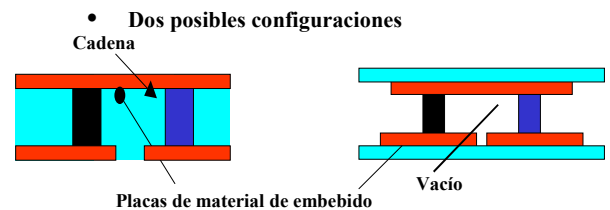


La exigencia de que el material entre el que va la bomba sea translucido viene impuesta por el uso que se quiere dar a la bomba de calor, ya que además de bomba de calor sería ventana del lugar que se quiere acondicionar.

Este tipo de bombas presentan multitud de ventajas respecto a los antiguos sistemas de climatización:

- Carácter de adaptación al entorno, pues va dentro de una ventana.
- Reducido tamaño (en comparación con otras bombas de calor) puesto que las placas solo necesitan unos milímetros de espesor.
- Ausencia de partes móviles (condensador, evaporador, compresor, etc), por lo tanto está exenta de vibraciones y del deterioro de sus partes.
- Ausencia de fluidos refrigerantes, dado que la única fuente de alimentación que se necesita es eléctrica, teniendo carácter reversible la bomba mediante el cambio de polaridad de la tensión.

Paramento transparente activo termoelectrico (PTA)



Modelo matemático:

Para el correcto entendimiento del funcionamiento de una bomba de calor hace falta conocer los fundamentos teóricos de los fenómenos termoelectricos y físicos que concurren en un termoelemento.

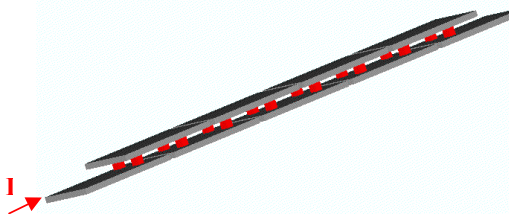
En las cadenas termoelectricas se dan una serie de fenómenos como el Seebeck, Peltier, Thomson, Joule o Fourier, la existencia de estos fenómenos es la que nos permite utilizar el circuito termoelectrico como una bomba de calor. Estos efectos mencionados están relacionados entre sí, lo cual muestra la complejidad de los fenómenos que tienen lugar en la célula termoelectrica que constituye nuestra unidad básica.

Para la correcta utilización del efecto Peltier en nuestra aplicación, es decir a la climatización, se tiene que hacer un breve estudio del comportamiento de un par ideal, definiendo tamaños y propiedades de los materiales, de forma que se tenga un rango de valores próximos que se podrían alcanzar en esta aplicación.

Para comenzar hay que recordar que la temperatura ideal de confort de un recinto habitado ha de mantenerse en el intervalo de 22°C a 24°C dependiendo de la estación del año. Por lo tanto se trabajará con las zonas más conflictivas en las que la cara fría tendrá que mantenerse siempre por debajo de la temperatura de 24°C en verano como condición esencial. Para ello se analizarán las intensidades en función de los incrementos de temperatura.

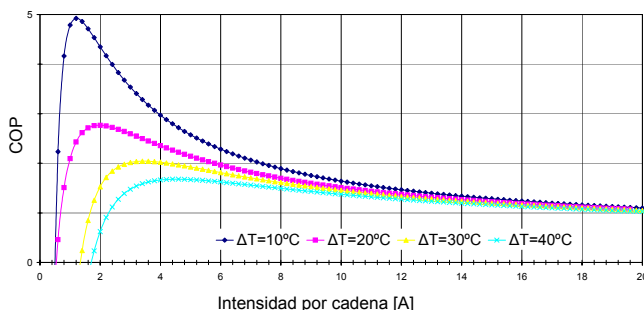
Debido a tratarse de un estudio elemental se simplifica la definición de la cadena elemental, descartándose la influencia de: Puentes eléctricos (placas de cobre) ; Paramentos transparentes (vidrio); y resistencias eléctricas y térmicas de contacto (de las placas de cobre y del material de soldadura). Solo se tendrá en cuenta las propiedades y el comportamiento de los termoelementos dependiente de las intensidades que circulan y la diferencia de temperaturas entre la cara caliente y la fría de los mismos. Además se consideran propiedades constantes con la temperatura.

Dado que las propiedades de los materiales son funciones de la temperatura, definiremos la propiedad media aritmética de los valores de las propiedades a las temperaturas de las cara fría y caliente de la cadena. Tendremos en cuenta que los termoelementos están conectados eléctricamente en serie (2 termoelementos en paralelo) y térmicamente en paralelo.



1.-Cadena termoeléctrica formada por la unión de termoelementos:

COP Tf=24°C



Instalación de ensayo:

Uno de los objetivos de los ensayos del paramento transparente activo termoeléctrico es la

evaluación de su comportamiento comparándolo con los datos obtenidos de forma teórica. Para ello es de vital importancia que el ensayo mida las variables características que presenta el análisis teórico, aspecto a priori sencillo, pero que requiere de una metodología y útiles especiales. Estas variables son, las temperaturas en los focos caliente y frío, la intensidad de trabajo. El ensayo también permitirá analizar otras variables que se presentan para ciertas condiciones dadas, y que presentan la ventaja de poder ser medidas y analizadas de manera sencilla, como la resistencia eléctrica, temperaturas en distintos puntos, etc.

Como se detalló anteriormente en el modelado de una cadena elemental, las variables que se utilizan, y por tanto tienen que estar reflejadas en el ensayo son: Temperaturas de focos frío y caliente para determinar el salto térmico de trabajo, el calor cedido al foco caliente y el calor absorbido en el foco frío. Realizando un balance de potencias se puede obtener la eficiencia (ó el COP) de la aplicación.

El paramento tiene que ensayarse con una de las caras a una temperatura si no constante al menos conocida. Para ello se dispone de un sistema de disipación en la cara caliente del paramento. En la cara fría se tendrá que conocer la potencia aplicada al paramento. Una de las formas más sencillas de hacer esto es utilizando una fuente medible de calor y con las temperaturas de trabajo se conocería la actuación del paramento.

La necesidad de medir la eficiencia de un PTA en comparación con la calculada mediante propiedades de materiales proviene de la incertidumbre de resistencias térmicas y eléctricas dentro del paramento conjuntamente con las pérdidas térmicas. Por lo tanto los cálculos pueden ser usados para evaluar el diseño del prototipo en cuestión. La incertidumbre de las propiedades de cada material se propagan y acumulan en los cálculos, limitando notablemente la exactitud resultante.

Como se analizó anteriormente:

$$\eta = \frac{Q_f}{P_e} = \frac{\sigma \cdot T_f \cdot I - \frac{1}{2} I^2 E \rho - \frac{\lambda}{E} (T_c - T_f)}{\sigma I (T_c - T_f) + I^2 E \rho}$$

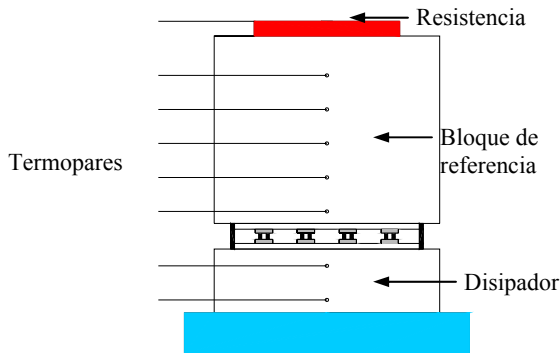
donde también

$$P_e = I \cdot U = I^2 \cdot R_{PARAMENTO}$$

La intensidad de la corriente eléctrica que atraviesa el módulo puede ser medida con facilidad mediante polímetros comerciales que además controlan la tensión, este punto no presenta ningún problema en términos de exactitud.

El mayor problema radica en la determinación del flujo de calor absorbido en el lado frío.

Una posibilidad para el ensayo consiste en usar la proporcionalidad espacial de diferencia de temperaturas resultante del flujo de calor conociendo las propiedades de los materiales utilizados.



.-Medida de calores en el prototipo mediante distribución de temperaturas.

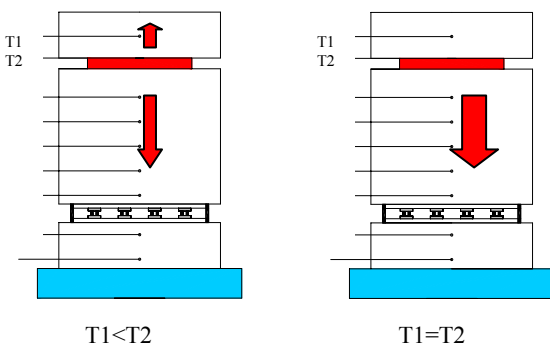
Este proceso es fácil de llevar a la práctica y de realizar, aunque existen problemas que limitan la exactitud de sus medidas.

En general las medidas comparativas no pueden ser más exactas que los datos accesibles por los materiales de referencia, la conductividad térmica para un bloque de referencia encima del paramento podría introducir un error del 5% para datos muy fiables. Se mediría la temperatura del bloque con termopares colocados en diferentes lugares de la pieza perfectamente conocidos, y mediante la tensión conocida se podría obtener la distribución de temperaturas de la pieza.

Las incertidumbres resultantes de la medida de diferencia de temperaturas, dado que la medida muy exacta es extremadamente difícil de realizar ya que el sensor suele influir en el sistema introduciendo calor del exterior (termopar), o por su resistencia interna.

Las pérdidas de calor en el bloque de referencia son difíciles de evaluar puesto que se basan en parámetros desconocidos. Dado que el flujo de calor no es unidireccional, no se tiene la precisión de sus pérdidas, la conducción del calor puede no ser homogénea en toda la pieza, por resistencias de contacto, etc, y así el flujo de calor no sería estimado con precisión.

Otro método consiste en determinar la producción de calor mediante el calor generado en la fuente, y si se puede garantizar que todo el módulo absorbe en el lado frío. Por esta razón la exactitud de las

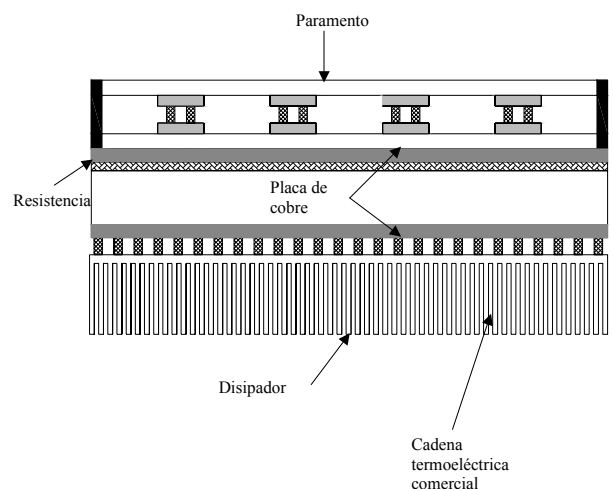


-Flujo de calor para el ensayo.

medidas dependerá de la distribución del flujo de calor y de las pérdidas o puentes térmicos.

Para alcanzar la exactitud en este flujo se usará el principio de un calorímetro adiabático, es decir, dado que el intercambio de calor por efecto Fourier está directamente relacionado con la diferencia de temperaturas independientemente del mecanismo de conducción. Por lo tanto, si el entorno se encuentra a la misma temperatura el intercambio de calor será nulo.

Esta clase de aislamiento se puede alcanzar mediante otra resistencia que haga que el entorno se encuentre a la misma temperatura que la primera resistencia, así el flujo de calor se producirá en la dirección deseada.



-Útil para el ensayo de prototipos.

Para llevar a cabo los ensayos se idearon distintas situaciones que pudieran representar situaciones de funcionamiento reales, para ello se plantearon modelos con disipación de calor con flujos de aire en distintas direcciones o elementos disipadores estáticos.

Para mejorar las prestaciones de nuestro paramento se tendría que utilizar materiales para las superficies transparentes que nos permitiesen una conducción muy buena para facilitar así la convección y disipar y absorber calor con el ambiente, sin embargo se necesita en el interior una muy mala conducción de las cadenas, para que no haya flujo de calor por el efecto Fourier de un extremo del cristal caliente al frío, reduciendo puentes térmicos no deseados.

Por este motivo se realizó vacío en el interior del PTA, dado que elimina la convección interior. El nivel de vacío tiene que ser tal que no se dañe las uniones soldadas entre termoelementos y puentes eléctricos.

La realización del vacío provoca un esfuerzo de compresión sobre las cadenas soportada por la sección transversal de los termoelementos. También se observa que dicho esfuerzo causado por la presión es aguantado por la estructura del marco, pero también por las cadenas

localizadas en el interior, dicha presión puede actuar con dos efectos claramente diferenciados, uno el de mejorar la esbeltez y así favorecer conducción eléctrica y mejorar las propiedades, y el segundo, el de causar excesivos esfuerzos que pudieran provocar la rotura de los termoelementos de la cadena.

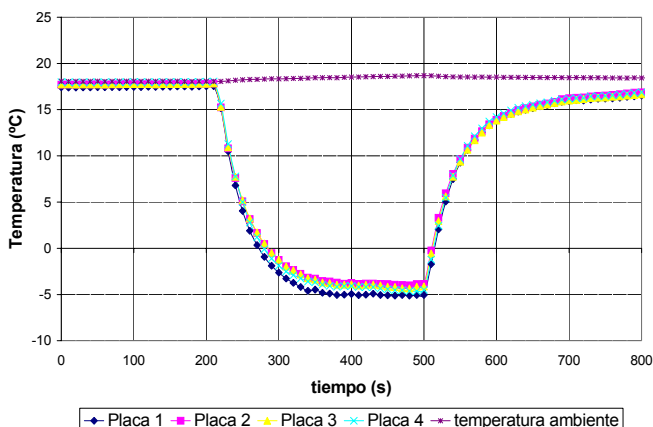
Ensayos y resultados:

El ensayo de la cadena se realizó colocando en una placa de aluminio (a modo de superficie disipadora) en la cara caliente, impregnada de una silicona conductora para garantizar la correcta transferencia de calor y conectada a una fuente de alimentación de corriente continua la cadena termoelectrica.

Se procedió a realizar medidas de temperaturas mediante una serie de termopares colocados en las cuatro cadenas del lado frío y conectados a un data logger para poder analizar transitorios térmicos. También se procedió a conectar un polímetro para medir con precisión las intensidades aplicadas a la cadena.

Se aplicaron diversas intensidades de corriente (rango de intensidades). Se aplicaron las corrientes sin sobrepasar el máximo de corriente que supone que el efecto Joule predomina frente al Peltier, dado que en dicho punto las temperaturas que alcanza la cadena en el foco frío pasan a ser superiores, este punto obtenido en la parte teórica dependiendo de la diferencia de temperaturas de trabajo (aproximadamente 10 A).

Temperaturas cadena I=6A



La gráfica anterior sirve para observar el comportamiento de la cadena frente a la intensidad de 6 Amperios.

Una vez estabilizadas las temperaturas se midieron en una de las placas frías para una temperatura aproximada en el lado caliente de 18°C.

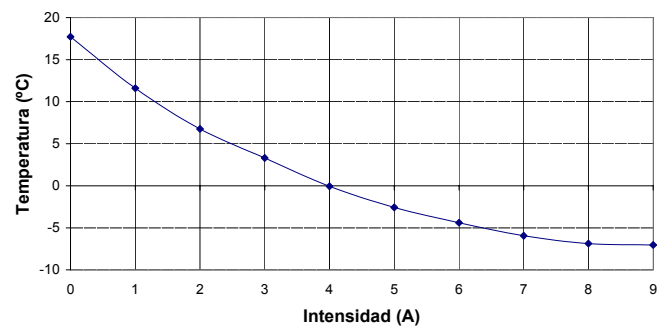
Las temperaturas alcanzadas en este caso son del orden de -5°C con un salto térmico aproximado de 24°C. Se tiene que tener en cuenta también que las placas de la zona fría en este caso además de soportar la convección

natural están sometidas a la condensación de vapor de agua del ambiente, teniendo la bomba de calor que absorber la energía para que este agua se condense. El tiempo en alcanzarse el estacionario se observa que es de aproximadamente 170 segundos.

En la gráfica siguiente se representa la temperatura estacionaria alcanzada en el lado frío para cada una de dichas intensidades.

Se observa claramente en la gráfica que no tiene sentido trabajar con valores superiores a 9 A. Es más ni si quiera convendría trabajar para intensidades mayores de 8A puesto que la disminución de temperatura en el lado frío es casi inapreciable.

Temperatura-Intensidad



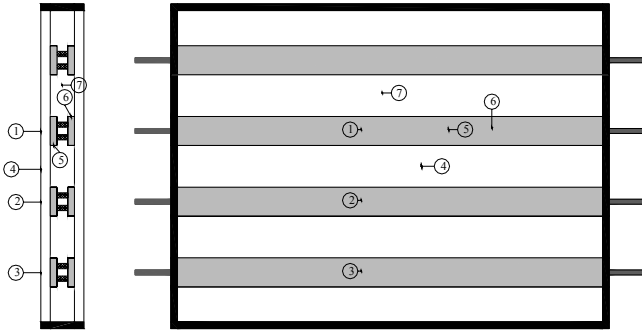
Una vez ensayadas la cadenas que se fabricaron para realizar el paramento, y terminado su montaje se procedió a realizar el ensayo sobre este. Uno de los objetivos de los ensayos del paramento transparente activo termoelectrico es la evaluación de su comportamiento comparándolo con los datos obtenidos de forma teórica.

Para realizar los ensayos de los prototipos se procedió a conectar el prototipo a una fuente de corriente continua, disipando calor en la cara caliente y a realizar un análisis y medición de los siguientes parámetros:

- La tensión aplicada en la fuente.
- La caída de potencial en el prototipo.
- Las temperaturas en diferentes zonas del prototipo.

Se realizó el estudio de cada prototipo, concretándose las mismas medidas para cada uno para diferentes condiciones de funcionamiento. Un primer ensayo realizado horizontalmente con una superficie de aluminio encargada de disipar calor. Segundo ensayo realizado verticalmente con un ventilador enfocado a la cara caliente para disipar calor. Mismos ensayos realizando vacío en el interior del PTA.

En el dibujo inferior se puede observar en que puntos se realizaron las medidas de las temperaturas mediante termopares tipo K colocados tanto en la superficie de cristal del prototipo como en las placas de las cadenas termoelectricas en el interior.



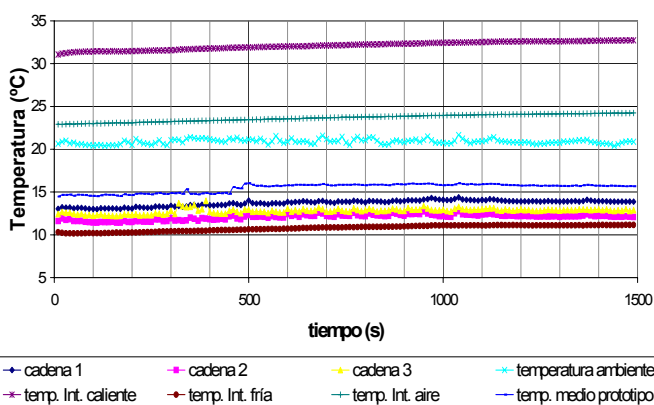
-Situación de termopares en prototipo .

En primer lugar se realizaron pruebas de continuidad eléctrica en los 2 prototipos fabricados para comprobar que las cadenas de los modelos se comportaban de igual manera, y no presentaban resistencias muy dispares, resultando defectuosas.

Resistencia eléctricas				
Cadena	Prototipo 1		Prototipo 2	
1	0,038	Ω	0,057	Ω
2	0,043	Ω	0,12	Ω
3	0,042	Ω	0,044	Ω
4	Cadena defectuosa		0,042	Ω
conjunto	0,13	Ω	0,27	Ω

Una vez analizadas las resistencias eléctricas se procedió al análisis de las temperaturas obtenidas para una intensidad de 4 Amperios y un bloque a modo de disipador. Estas se midieron durante un período de 25 minutos en intervalos de 10 segundos, los datos obtenidos se presentan en la siguiente gráfica.

Temperaturas prototipo nº1 I=4A



Se observa en el gráfico que para una potencia de $P_e = I \cdot U = 0,519 \cdot 4 = 2,07W$ se alcanza un incremento de temperaturas de 20°C entre las placas caliente y fría.

Se realizó el mismo ensayo para el segundo prototipo pudiendo destacarse que los resultados eran similares salvando las diferencias provocadas por las

cadena defectuosas, que distorsionaban levemente las mediciones.

Dado que el paramento termoelectrico estudiado tiene su aplicación como superficie delimitadora de espacios abiertos, el método de disipación de calor con el ambiente normalmente será una corriente de aire, y puesto que la convección natural no es suficiente en la mayoría de los casos, se habría que optar por una convección forzada mediante ventiladores. Por ello se optó por realizar otros dos ensayos en los que se fuerza una corriente de aire en el lado caliente, trabajando el prototipo con convección natural en el lado frío.

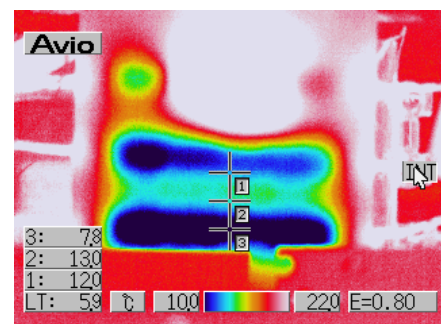


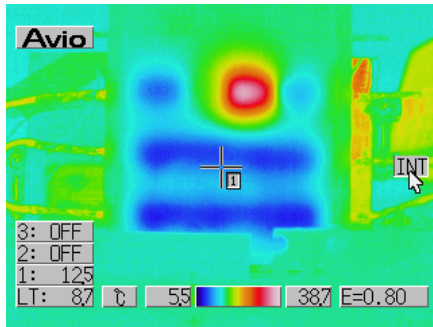
-Esquema de ensayo para la medidas de temperaturas con un flujo de aire en la cara caliente para un prototipo de PTA.

Con estos ensayos se compro lo esperado, que los resultados empeoraban, las temperaturas eran superiores en tres grados, esto es debido a que la disipación, al tratarse el método de convección, era menor.

Se realizo posteriormente los mismos ensayos con el vacío en el paramento, pudiendo resaltarse que como se esperaba mejoraban las propiedades, pero en ocasiones se dañaba estructuralmente las uniones entre termoelementos del prototipo.

Se realizaron además ensayos con una cámara termográfica para observar con detalle la distribución de temperaturas en el prototipo 2 para intensidades de 4,5A y 7A.





Para la intensidad de 7A se alcanzan temperaturas más bajas que para 4,5A, obteniéndose hasta 10° C en la superficie del paramento, pero se observa que la distorsión de la cadena defectuosa es más acusada.

Se concluye que el análisis de temperaturas con cámara termográfica con mapa de temperaturas es muy útil para evaluar en cada punto la variación de temperaturas, obteniéndose al instante, y pudiendo evaluar cuantitativamente los defectos del paramento, muy útiles para su posterior corrección y perfeccionamiento de este.

Conclusiones:

Se ha comprobado que unos útiles más precisos que los utilizados, como los diseñados en este proyecto, añadirían un grado de exactitud mucho mayor, e implicarían unas mejoras en las actuaciones del PTA. También se ha comprobado, que por el método de fabricación empleado, la fiabilidad de las cadenas empleadas en el prototipo hacen que los ensayos sean menos precisos de lo deseado, y cadenas que aguanten la constante manipulación y ensayos harían que los datos de los ensayos mejorasen en rigurosidad y en actuaciones mejores.

Agradecimientos:

Especiales agradecimientos a los directores del proyecto fin de carrera Antonio Arenas y Jorge Vázquez por su ayuda e interés durante de todo el proceso de estudio y ensayo en el laboratorio y a la Cátedra Rafael Mariño por la oportunidad brindada.

Referencias:

- Arenas A., Determinación de nuevos criterios de diseño para la optimización de una bomba de calor termoeléctrica. Universidad Pontificia Comillas, Madrid 1999.
- V. A. Semenyuk, Advances in Development of Thermoelectric Modules for Cooling Electro-Optic Components. Thermion Company, Ukraine. 22nd International Conference on Thermoelectrics 2003.

- E.W. Müller, H. Ishimabushi. New approach for highly accurate efficiency determination of thermoelectric generator modules. Institute of Materials Research, Germany. 22nd International Conference on Thermoelectrics 2003.
- Yasushiko Hori, Daisuke Kusano. Fabrication and evaluation of Bi-Te/Pb-Te cascade type thermoelectric module. Central Research Institute of Electric Power Industry, Japan. 22nd International Conference on Thermoelectrics 2003.