

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Mecànica

Títol: Determinació dels desfasaments duals en materials termoelèctrics porosos

Document: Document 1 – Memòria

Alumne: Marc Teixidor Vilarrasa

Tutor: Eduard Massaguer Colomer; Albert Massaguer Colomer
Departament: Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial
Àrea: Màquines i Motors Tèrmics

Convocatòria (mes/any): Juny 2023

-Agraïments

M'agradaria dedicar les primeres paraules d'aquest treball a GREFEMA (Grup de Recerca en Enginyeria de Fluids, Energia i Medi Ambient) de la Universitat de Girona, i en especial als meus tutors l'Albert i l'Eduard, per haver-me donat la oportunitat de realitzar aquest TFG dins l'àmbit de la recerca i poder-me iniciar en la investigació. Estic molt content amb la feina que hem fet, m'han donat molta llibertat i alhora m'han anat guiant i acompanyant al llarg del treball.

També voldria fer un agraïment a la meua família, en especial a la meua mare per haver estat sempre al meu costat.

·Índex

1.- INTRODUCCIÓ	4
1.1.- Antecedents	4
1.2.- Objecte.....	4
1.3.- Abast i especificacions	5
2.- FONAMENTS TEÒRICS	6
2.1.- Transmissió de la calor per conducció	6
2.2.- Models utilitzats per descriure la conducció de la calor.....	6
3.-METODOLOGIA GENERAL	11
4.- MUNTATGE EXPERIMENTAL	12
4.1.- Muntatge	12
4.1.1.- Escalfador	15
4.1.2.- Compartiments pel material d'assaig	16
4.1.3.- Escuma aïllant externa	16
4.1.4.- Termoparells	17
4.1.5.- Posicionament i suport dels termoparells	17
4.2.- Sistema d'alimentació.....	19
4.3.- Sistema d'adquisició de dades	19
5.- ASSAJOS AL LABORATORI.....	21
5.1.- Elecció del material d'assaig	21
5.2.- Metodologia d'assaig al laboratori	22
6.- MODEL MATEMÀTIC	24
6.1.- Model matemàtic Dual-Phase Lag	24
7.- PROCESSAT DE DADES.....	28
7.1.- Error i exactitud de les mesures.....	28
7.1.1.- Temperatura	28
7.1.2.- Potència	28

7.1.3.- Metodologia tractament d'error	28
7.2.- Metodologia de processament de dades.....	30
8.- DADES, RESULTATS I CONCLUSIONS	35
8.1.- Dades i Resultats	35
8.1.1.- Dades utilitzades a les simulacions teòriques.....	35
8.1.2.- Resultats.....	36
8.1.2.1.- Assajos 10V	36
8.1.2.2.- Assajos 15V	42
8.1.2.3.- Assajos 20V	47
8.1.2.4.- Globals	51
8.2.- Conclusions	52
8.2.1.- Conclusions experimentals	52
9.- SIMBOLOGIA	56
10.- BIBLIOGRAFIA.....	57
11.- RELACIÓ DE DOCUMENTS	58

1.- INTRODUCCIÓ

1.1.- Antecedents

Els generadors termoelèctrics són uns dispositius que permeten transformar gradients de temperatura en corrent elèctric. Actualment el seu rendiment és relativament baix (al voltant d'un 5% en versions comercials), tot i que el potencial teòric d'aquesta tecnologia és més elevat. Una de les línies de recerca de GREFEMA UdG és la possible utilització de materials porosos (com per exemple els nanotubs de carboni o "CNT") per tal de poder-ne augmentar el rendiment, el qual depèn directament del flux energètic que s'aprofita respecte el gradient de temperatura que es genera a les plaques del generador. Actualment GREFEMA està treballant en un projecte dins la convocatòria "Proyectos de Transición Ecológica y Transición Digital", amb el projecte "Mejora de la eficiencia de generadores termoeléctricos mediante el uso de materiales de medio poroso con respuesta térmica no-Fourier y pulsos térmicos periódicos".

Per materials porosos s'entén que són aquells materials on gran part del seu volum està compost per cavitats. En el cas del material utilitzat per aquest estudi, al tractar-se d'un agregat format a partir d'una gran quantitat de nanotubs individuals, la porositat global del material és molt alta, ja que cada nanotub té l'interior buit, i entre nanotubs també es formen cavitats al no estar compactat. En aquests materials porosos, quan se'ls apliquen polsos de calor, s'observen un certs desfasaments temporals entre el flux de calor i el gradient de temperatura respecte del model de la llei de Fourier de transmissió de calor per conducció. Aquests desfasaments poden variar segons diversos factors, com poden ser el gruix del material, la seva porositat i la tortuositat del flux de calor (es podria descriure la tortuositat com la complicació del camí que ha de seguir la calor per avançar), etc. Aprofitant aquests desfasaments entre temperatura i flux de calor, segons els models teòrics, hi ha una zona temporal en el règim transitori on el rendiment obtingut podria ser més elevat. El projecte de GREFEMA es basa en aprofitar els desfasaments temporals d'aquests materials per millorar el rendiment de generadors termoelèctrics mitjançant polsos tèrmics. Per fer-ho, el grup necessita trobar els desfasaments en aquests materials, per això ha sorgit la necessitat d'elaborar aquest treball.

1.2.- Objecte

L'objectiu final d'aquest treball de final de grau és obtenir els valors de desfasament de materials porosos, més concretament de nanotubs de carboni, segons el model "Dual-Phase-Lag" de conducció de calor.

1.3.- Abast i especificacions

Per elaborar el treball, caldrà aprendre una base teòrica dels coneixements termodinàmics i de materials per entendre els conceptes amb els que es treballarà. Posteriorment serà necessari dissenyar i desenvolupar un muntatge i un mètode experimental per assajar-ho. Caldrà dur a terme diversos experiments amb diverses condicions, processar-ne les dades i finalment obtenir els valors dels desfasaments, representar gràficament els resultats i extreure'n les conclusions.

Cal mencionar que en l'actualitat no existeix al mercat cap equip que permeti obtenir els valors de desfasament, i hi ha poca literatura al respecte. Per tant, la construcció i validació de l'equip serà molt important en el futur desenvolupament de la línia de recerca i també per a la caracterització de futurs materials.

2.- FONAMENTS TEÒRICS

2.1.- Transmissió de la calor per conducció

En termodinàmica hi ha tres modes bàsics de transport de la calor: conducció, convecció i radiació. Aquest Treball de Final de Grau es basa en l'estudi del fenomen de conducció, i més concretament en sòlids.

De manera general, la transmissió de calor per conducció es pot descriure com l'intercanvi d'energia a través de les col·lisions i interaccions entre partícules, àtoms i molècules a l'interior d'un cos, o entre diferents cossos en contacte directe.

A nivell microscòpic, la conducció de la calor ve determinada principalment pels electrons i els fonons. Els electrons són les partícules subatòmiques amb càrrega negativa. Els fonons són una manera de quantificar els modes de vibració de la matriu d'àtoms d'un material, i es poden modelitzar en forma d'ona o de partícula. En un material metàl·lic, per exemple, on hi ha gran quantitat d'electrons lliures, és més fàcil que hi hagi interaccions entre electrons i, degut a això, es transmeti millor la calor per conducció, per aquest motiu (entre d'altres) de manera general els metalls són bons conductors tèrmics.

Hi ha diversos models que descriuen la conducció tèrmica, ja sigui a nivell macroscòpic o microscòpic, o també segons la física que apliquin poden ser models estacionaris, transitoris, models relativistes o fins i tot models quàntics. En el següent apartat s'introdueixen diversos models de conducció de la calor, fins a arribar al model que s'utilitza en aquest treball.

2.2.- Models utilitzats per descriure la conducció de la calor

De manera clàssica, per descriure la conducció de calor s'utilitza la llei de Fourier (desenvolupada per Joseph Fourier el 1822), que es descriu en la seva manera diferencial a l'Equació 1. Aquesta llei descriu que el flux de calor local és igual al producte entre la conductivitat tèrmica del material i el gradient de temperatura negatiu.

$$\vec{q}(\vec{r}, t) = -\mathbf{k} \nabla T(\vec{r}, t) \quad (\text{Eq. 1}) \text{ (Llei de Fourier)}$$

On \vec{q} és el vector del flux de calor (en W/m²), que depèn de \vec{r} , que és el vector posició del volum de material (en metres), i de t , que és el temps (en segons). La \mathbf{k} és la conductivitat tèrmica del material (en W/(m*K)), la T és la temperatura (en K) i l'operador $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}\right)\vec{i} + \left(\frac{\partial}{\partial y}\right)\vec{j} +$

$(\frac{\partial}{\partial z})\vec{k}$ és el gradient en l'espai tridimensional, per tant ∇T és el gradient de temperatura (en K/m).

Aquesta llei, però, assumeix una resposta instantànea del gradient de temperatura respecte el flux de calor, fet que implica una velocitat infinita de propagació de la calor. Per aquest motiu, si s'analitza des d'un punt de vista de la física relativista, entra en conflicte amb la pròpia teoria de la relativitat. A més, no es pot identificar cap diferència entre causa i efecte, ja que tant la propagació de la calor com la generació del gradient de temperatura succeeixen hipotèticament al mateix instant de temps. Des del punt de vista del camp de l'enginyeria, habitualment això no és un problema, ja que es sol treballar a escales "macro" i amb temps relativament grans. Per aquest motiu és suficientment vàlida la utilització de la llei de Fourier. Tot i així, quan es tracta amb temps i distàncies petites, a nivell "micro" i "nano", o s'estudien fenòmens d'interacció entre partícules en materials discrets (com és l'objecte d'aquest treball) s'observa clarament que la llei de Fourier no descriu amb suficient exactitud el transport tèrmic.

Llavors, a escales microscòpiques, com s'ha descrit a l'apartat anterior, s'apliquen models de transmissió del calor basats en la interacció entre electrons i fonons, i per tant, es treballa amb lleis quàntiques. La teoria dins aquest camp pot arribar a ser molt extensa, es pot parlar de fenòmens d'interacció electró-electró, fonó-electró, dispersió de fonons ("phonon scattering"), el comportament i modelització dels fonons com a ones i com a partícules, es poden analitzar patrons de difusió de partícules, així com els "mean free time" i "mean free path" entre col·lisions de partícules, etc. Hi ha una gran base teòrica, però a continuació s'expliquen els models de desfasament, fins a arribar al model de desfasaments duals, de la manera més senzilla possible sense haver d'entrar en complexos conceptes teòrics. Cal dir que emprar models d'aquests tipus ens allunya de la comprensió física del problema, ja que desapareixen les magnituds físiques anomenades anteriorment, però té l'avantatge de ser una modelització més comprensible i manejable per a enginyers, i que alhora no compromet la sensibilitat, objectivitat i equivalència del model en relació a la realitat.

En els models de desfasament, per tenir en compte la velocitat finita de l'ona tèrmica, es pot incorporar un retard, també anomenat temps de relaxació, i es pot escriure una adaptació de la llei de Fourier incorporant aquest desfasament:

$$\vec{q}(\vec{r}, t + \tau) = -k \nabla T(\vec{r}, t) \quad (\text{Eq.2})$$

On τ és el desfasament temporal (temps de relaxació, en segons), i la resta de paràmetres són els mencionats a la Llei de Fourier (Eq.1).

L'Equació 2, mitjançant l'expansió per series de Taylor de τ respecte el temps (t), es pot escriure com l'equació de Cattaneo-Vernotte (1958) descrita a l'Equació 3. Aquesta equació té en compte l'efecte de primer ordre del temps de relaxació τ , i per tant, de la mateixa manera que l'Equació 2, la velocitat de l'ona tèrmica és finita.

$$\vec{q}(\vec{r}, t) + \tau \frac{\partial \vec{q}}{\partial t}(\vec{r}, t) \cong -k \nabla T(\vec{r}, t) \quad (\text{Eq.3}) \text{ (Cattaneo - Vernotte)}$$

Segons Chester (1963), a partir de l'Equació 4 es pot relacionar de manera directa el temps de relaxació amb la velocitat de l'ona tèrmica i la difusivitat tèrmica del material.

$$\tau = \frac{\alpha}{c^2} \quad (\text{Eq.4})$$

On τ és el temps de relaxació o desfasament, α és la difusivitat tèrmica del material (en m^2/s) i c és la velocitat de l'ona tèrmica (en m/s).

Amb aquesta relació es pot observar com en cas que la velocitat de l'ona tèrmica es consideri infinita (que seria l'assumpció que fa la llei de Fourier), el desfasament o temps de relaxació passa a ser zero. Llavors, al ser zero, si s'aplica a l'Equació 3 (de Cattaneo-Vernotte), aquest temps de relaxació s'elimina i es passa a tenir l'Equació 2, la de Fourier. Per tant, amb el model Cattaneo-Vernotte es pot treballar tant assumint que la velocitat de l'ona tèrmica és finita (i es considera el desfasament temporal), o també que la velocitat és infinita i no es considera el desfasament temporal i s'obté l'equació general de la llei de Fourier.

Per tal de poder solucionar les dues incògnites de l'Equació 3 (la T i la \vec{q}), el que es pot fer és utilitzar l'equació d'equilibri d'energies en un temps concret, la qual es mostra a continuació:

$$-\nabla \cdot \vec{q}(\vec{r}, t) + Q(\vec{r}, t) = C_p \frac{\partial T}{\partial t}(\vec{r}, t) \quad (\text{Eq.5})$$

On C_p és el calor específic volumètric (en $\text{J}/(\text{K} \cdot \text{m}^3)$) extret a partir de la fórmula $C_p = \rho c_p$ (on ρ és la densitat en Kg/m^3 i c_p és el calor específic del propi material en $\text{J}/(\text{Kg} \cdot \text{K})$), la Q és la

calor aportada pel propi sòlid (en W/m^2), i la resta de paràmetres són coneguts de les equacions anteriors.

Per tant, si es fa un sistema amb les dues equacions (Eq.3 i Eq. 5), es podren obtenir els valors de T i \vec{q} .

Pel que es refereix a l'Equació 3, la del model Cattaneo-Vernotte, tot i permetre un desfasament entre el flux de calor i el gradient de temperatura, encara suposa una resposta immediata entre el gradient de temperatura i el transport d'energia, per tant, s'assumeix un flux de calor instantani. En altres paraules, el gradient de temperatura és sempre la causa del flux de calor, i el propi flux de calor és sempre l'efecte.

Finalment, s'arriba al model en el que es basa aquest TFG, el model de desfasaments duals ("dual-phase-lag model" o "DPL"). Aquest model permet eliminar la suposició que el gradient de temperatura és sempre la causa i el flux de calor és sempre l'efecte, tal com assumia prèviament el model d'ona de calor de Cattaneo-Vernotte. En aquest model, descrit per l'autor D.Y. Tzou l'any 1995, permet intercanviar els papers de causa-efecte entre el gradient de temperatura i el vector de flux de calor. Per aquest motiu, tal com es pot observar a la següent equació, apareixen el desfasament pel flux de calor i el desfasament pel gradient de temperatura.

$$\vec{q}(\vec{r}, t + \tau_q) = -k \nabla T(\vec{r}, t + \tau_T) \quad (\text{Eq. 6})$$

On τ_q és el desfasament del flux de calor (en segons), τ_T és el desfasament del gradient de temperatura (en segons), i la resta de paràmetres són els exposats a les equacions anteriors.

Ara es pot observar com en el cas que $\tau_T > \tau_q$ el flux de calor és el causant del gradient de temperatura, ja que primer succeeix el flux de calor i posteriorment es genera el gradient de temperatura. En canvi, si $\tau_T < \tau_q$, llavors primer succeeix el gradient de temperatura (causa) i posteriorment s'indueix el flux de calor (efecte). També cal observar que, de la mateixa manera que amb el model de Cattaneo-Vernotte, en cas que els desfasaments siguin 0 es passa a tenir l'equació de Fourier, per tant, aquest model pot descriure tant el comportament desfasat, com el tradicional de Fourier sense desfasament.

Posteriorment, es pot escriure l'Equació 5 d'una forma semblant a la de l'Equació 3, s'obté la següent equació:

$$\vec{q}(\vec{r}, t) + \tau_q \frac{\partial \vec{q}}{\partial t}(\vec{r}, t) \cong -k \left\{ \nabla T(\vec{r}, t) + \tau_T \frac{\partial}{\partial t} [\nabla T(\vec{r}, t)] \right\} \quad (\text{Eq.7})$$

Aquesta equació es pot considerar una de les equacions bàsiques del model de desfasaments duals. Com es pot observar, hi ha els dos desfasaments τ_T i τ_q , cosa que permet eliminar les suposicions causa-efecte esmentades anteriorment.

A partir d'aquesta equació, es fa una descripció del model matemàtic utilitzat per realitzar aquest treball a l'Apartat 5.

3.-METODOLOGIA GENERAL

De manera general, la metodologia a seguir per tal de trobar els valors dels desfasaments dels nantoubs de carboni és la següent:

El primer pas és dissenyar un muntatge que permeti fer assajos al material. Aquest muntatge ha de tenir la capacitat de poder aplicar polsos de calor, amb potència i duració mesurables i regulables. També ha de tenir diversos punts de mesura de temperatura, i amb una resposta ràpida dels sensors de mesura (en aquest cas, termoparells). Aquests termoparells han de permetre adquirir corbes de temperatura-temps a diverses posicions dins el material.

Posteriorment és necessari fer una neteja i processat de les dades obtingudes al laboratori per tal de poder-hi aplicar el model Dual-Phase-Lag mitjançant un programa en Fortran. Aquest programa permet obtenir múltiples corbes temperatura-temps amb diversos valors de desfasaments, potència del pols, posició del termoparell, i la conductivitat i difusivitat tèrmiques del material. Un cop es tenen aquestes corbes temperatura-temps, es comparen les corbes teòriques amb les experimentals utilitzant un programa de Matlab, i s'obtenen els valors de desfasament de la corba que millor s'adapta. Es tracta d'un procés iteratiu, on es comença amb un rang de valors de desfasament alt, i a mesura que es fan les iteracions es s'acota la zona d'error mínim, fins a obtenir els valors de desfasament adequats per la corba de temperatura-temps de cada termoparell. Finalment també és important incloure les incerteses i errors de mesura als valors de desfasament obtinguts, de manera que al final s'acaben trobant els rangs de valors on es troben els desfasaments, que és l'objectiu principal del treball.

Als capítols 5.2, 7.1.3 i 7.2 s'expliquen més en detall les metodologies seguides durant els assajos al laboratori, durant el tractament de les incerteses i durant el processat de dades.

4.- MUNTATGE EXPERIMENTAL

4.1.- Muntatge

El muntatge experimental s'ha dissenyat des de zero, ja que hi ha poca literatura al respecte sobre un possible muntatge per aquest tipus d'experiment. De fet, l'única referència que s'ha trobat és al llibre "Macro- to Microscale Heat Transfer, The Lagging Behavior" ^[1] de D.Y. Tzou, on hi ha l'esquema de dos possibles muntatges per determinar els desfasaments, però són complicats d'elaborar, per això és més factible fer-ho amb el muntatge que es proposa en aquest TFG.

A l'inici del treball es va dissenyar un muntatge on a cada extrem hi havia una placa termoelèctrica refredadora i també un bloc d'alumini per fer-hi circular líquid refrigerant utilitzant un "chiller". Es van realitzar diversos assajos amb aquest muntatge, però posteriorment es va veure que al tenir la refrigeració, no es complien les condicions considerades al model teòric (es considera completament aïllat). Tot i així, aquest muntatge inicial va ser útil per al grup de recerca, ja que es van realitzar assajos en règim estacionari, on sí que era necessària la refrigeració. Posteriorment, i veient que els assajos transitoris inicials amb el muntatge refrigerat no s'adaptaven al model teòric, es va decidir modificar el muntatge. Es van treure les plaques refrigeradores i els blocs del "chiller" i es van aïllar els laterals del muntatge per tal de minimitzar les pèrdues energètiques. Per tant, el muntatge que finalment s'ha utilitzat per extreure les dades i poder obtenir els resultats d'aquest estudi és el muntatge aïllat.

A continuació s'adjunten diverses imatges i croquis del muntatge, i posteriorment, en els següents apartats es fa una descripció més detallada dels components més importants.

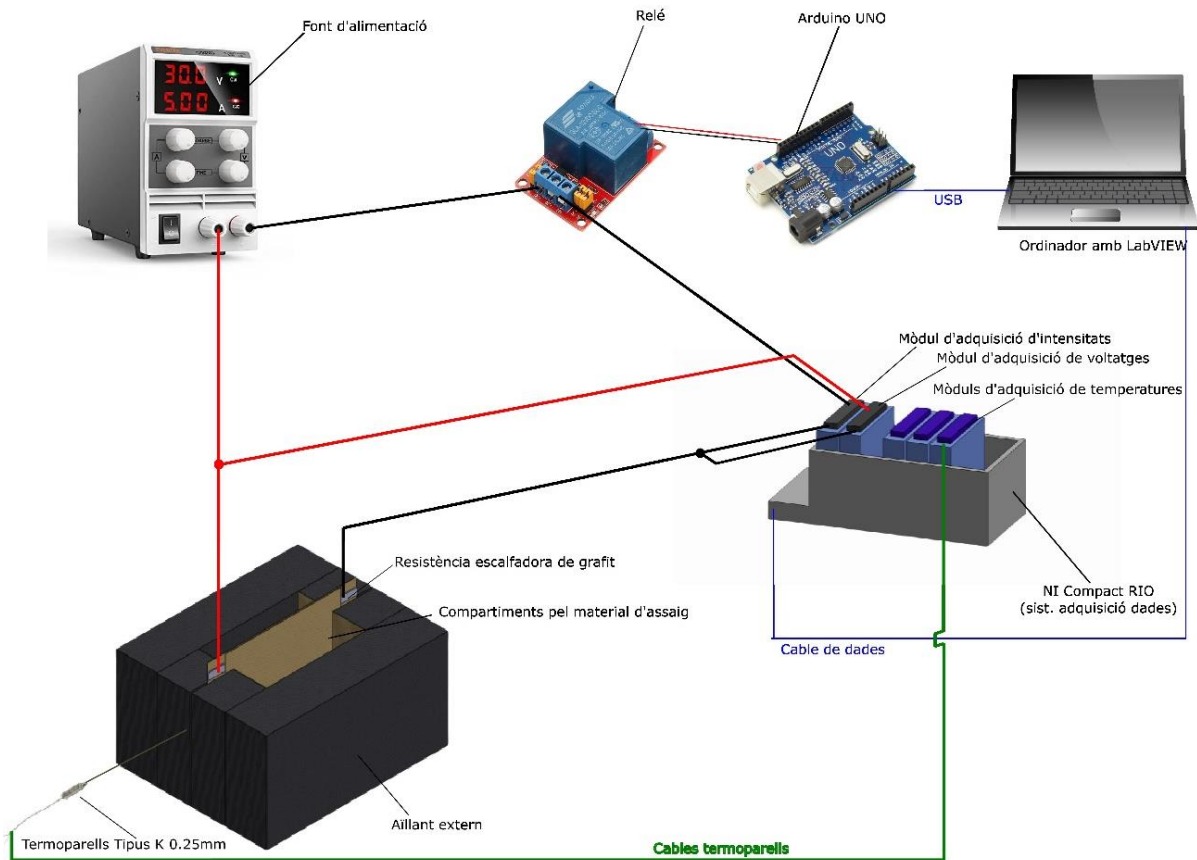


Figura 1.- Esquema general del muntatge al laboratori.

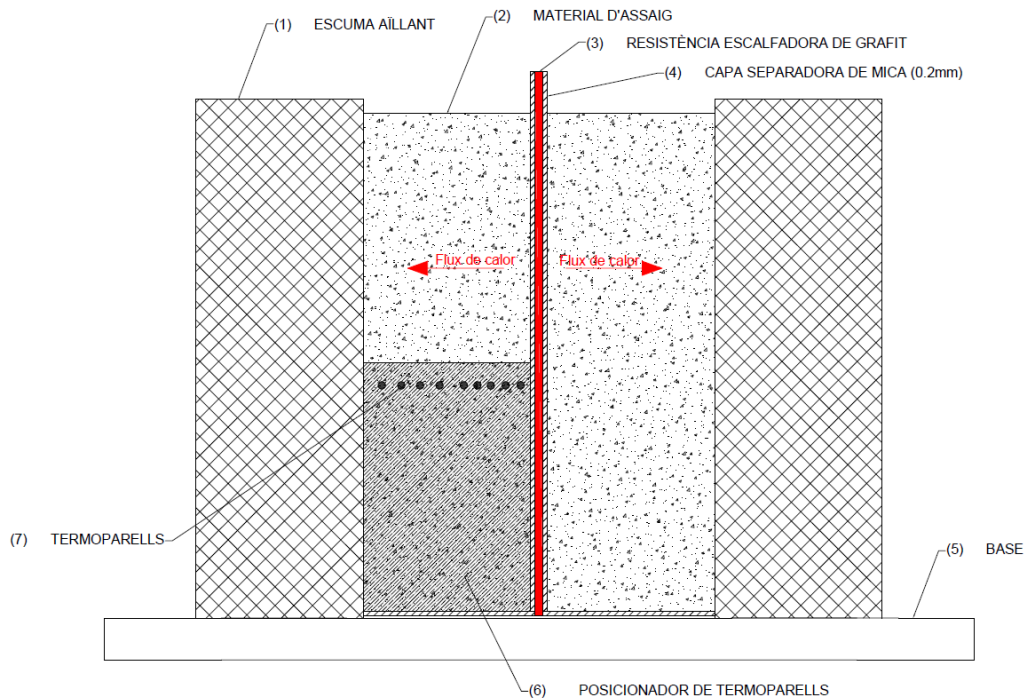


Figura 2.- Croquis de la secció del muntatge i els nombres de referència per tal de poder referir-s'hi a les descripcions. Es mostraran les referències respecte a aquesta figura entre parèntesis ().

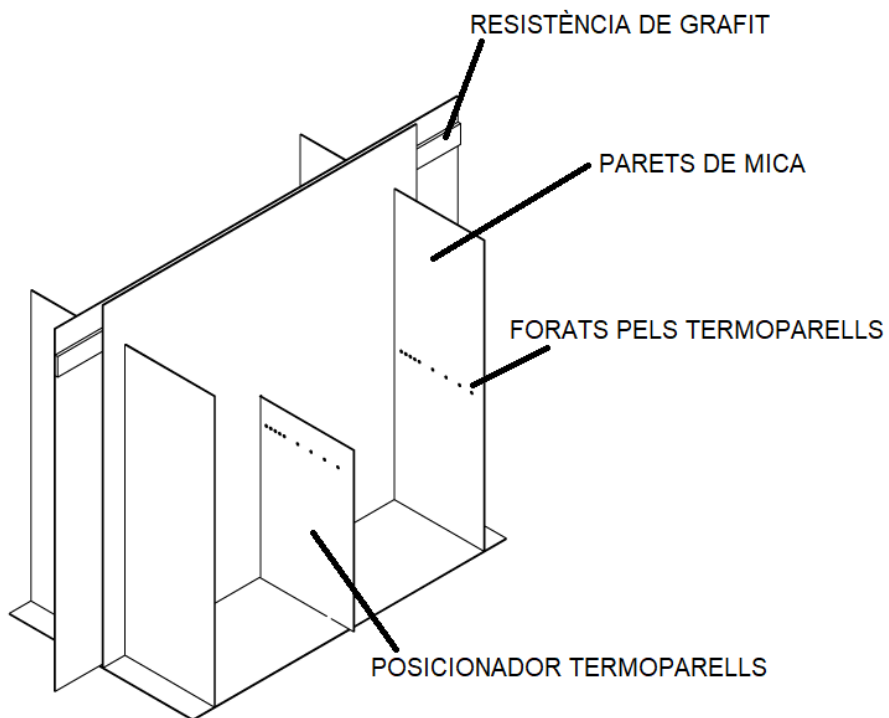


Figura 3.- Croquis del muntatge sense els aïllants externs, on es pot observar la situació del posicionador de termoparells dins la zona d'assaig.

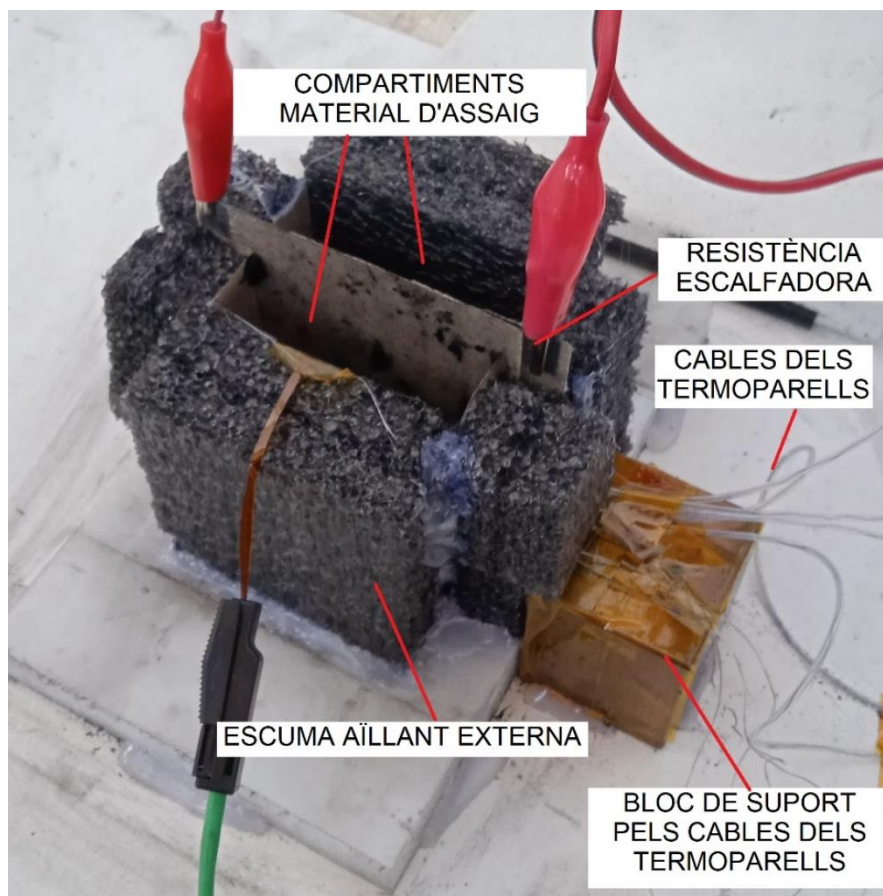


Figura 4.- Imatge del muntatge aïllat al laboratori.

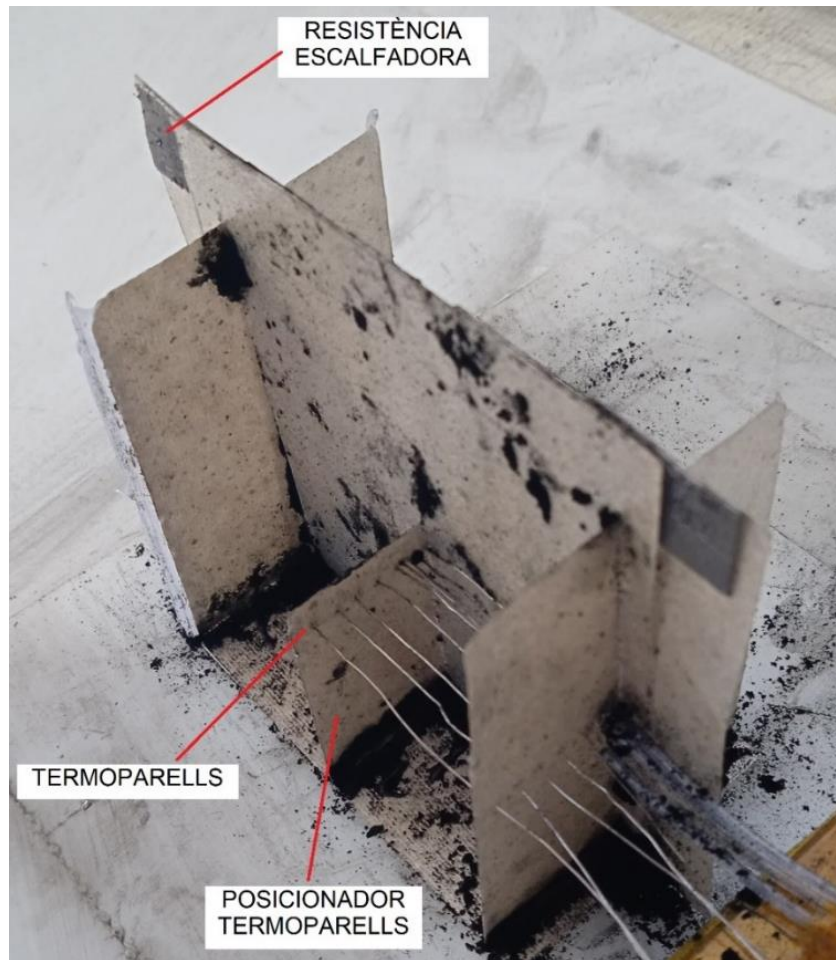


Figura 5.- Imatge del muntatge desmuntat, d'aquesta manera es veu la zona d'assaig de material, amb restes de nanotubs.

El plànol de conjunt, l'explorant i els plànols d'especejament dels diversos components del muntatge es troben al "Document 2.- Plànols".

4.1.1.- Escalfador

El muntatge té una resistència escalfadora de grafit (3) al centre per tal de poder generar un pols de calor. El propi escalfador està format per una làmina de grafit de 0,6 mm de gruix, tallada a mà de per tal de generar una forma com la que es mostra a la Figura 6, amb uns canals d'uns 4mm pels quals hi passa l'electricitat i es genera calor. Aquest escalfador de grafit es troba "encapsulat" entre dues plaques de mica (4), per tal d'evitar el contacte elèctric directe amb el material d'assaig, i alhora per garantir una repartició el màxim homogènia per tota la cara calenta. Es poden observar els extrems de la resistència de grafit, per on es connecta l'alimentació elèctrica, a les Figures 3, 4 i 5.

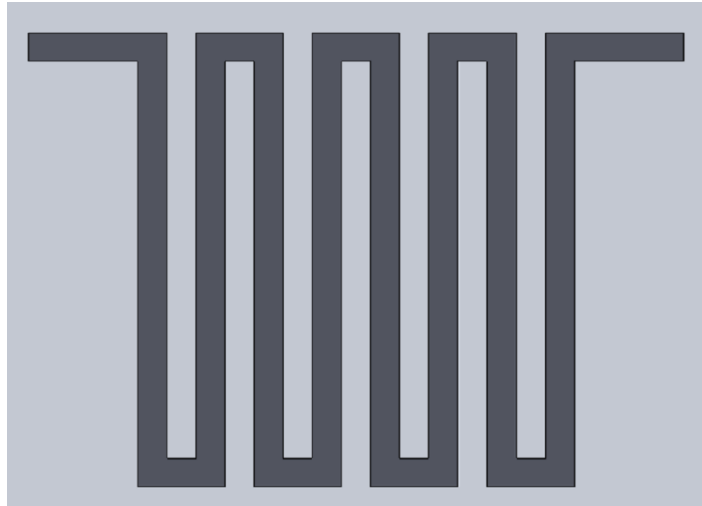


Figura 6.- Representació al Solidworks de la forma en que es va tallar l'escalfador de grafit.

4.1.2.- Compartiments pel material d'assaig

Per tal de tenir el material d'assaig delimitat, hi ha dos compartiments pel material (2) fets amb plaques de mica de 0.2mm de gruix (4). Aquestes plaques són aïllants (cosa que permet minimitzar les pèrdues de calor per les parets exteriors), són econòmiques i relativament fàcils de manipular a l'hora de tallar-les i muntar-les. Les dimensions de cada compartiment són de 60x60x20mm, on la dimensió de 20mm és en la direcció del flux de calor. El motiu que l'alçada i amplada (60mm) siguin més grans que els 20mm que ha de recórrer el flux, és per tal que la zona del centre del material, on es fan les mesures de temperatura, quedi el més aïllada possible respecte l'exterior i minimitzar les pèrdues de calor.

Es poden veure els compartiments pel material a les Figures 2, 4 i 5. En aquesta darrera figura encara hi ha restes de nanotubs de carboni, de color negre a les imatges.

4.1.3.- Escuma aïllant externa

Tot i les parets de mica i el dimensionat dels compartiments d'assaig per tal de minimitzar les pèrdues tèrmiques, es va haver d'utilitzar escuma aïllant per aïllar tèrmicament el muntatge. Aquesta escuma es pot observar clarament a la Figura 4. Es tracta de diversos talls d'una planxa d'escuma de polietilè. Tal com ja s'ha comentat, als primers assajos aquest aïllant no hi era, però es va decidir afegir-lo per tal de millorar la relació entre les dades experimentals i teòriques, ja que als primers resultats s'observaven efectes deguts a les pèrdues, que augmentaven amb la distància respecte la cara calenta i també amb el temps transcorregut. Aquest aïllant ha permès obtenir resultats més semblants a les prediccions del model teòric ja

que disminueix les pèrdues tèrmiques. Es fa un anàlisi més en detall de l'efecte de l'aïllant a les conclusions del treball.

4.1.4.- Termoparells

Per tal d'adquirir les lectures de temperatura s'han utilitzat termoparells de tipus K amb la punta de 0.25mm. S'han escollit aquest tipus de termoparells pel seu temps de resposta curt, ja que proporcionen una resposta tèrmica inferior als 0.01 segons, cosa molt important en assajos transitòris ràpids com els que es realitzen en aquest treball. Es comenten les lectures d'aquests termoparells, el seu error, i maneres de millorar-les a l'apartat de conclusions. L'error de lectura segons el fabricant s'especifica a la següent taula:

	Error
Termoparell tipus K – 0.25mm	+/- 0.9°C

Taula 1.- Taula on es mostra l'error relatiu dels termoparells segons el fabricant.

4.1.5.- Posicionament i suport dels termoparells

A una de les bandes del muntatge, dins el compartiment on hi ha el material d'assaig, han d'anar-hi situats els termoparells per les lectures de temperatura al centre del material. És crucial que els termoparells es trobin al mateix pla (per tal de poder simplificar el model matemàtic a un sol pla, i no en l'espai tridimensional). També és important conèixer la posició exacta de cada termoparell, que no es toquin entre ells, i com més al centre del material d'assaig es trobin, millor. Tots aquests paràmetres són crítics per tal d'obtenir unes bones lectures experimentals i poder tenir controlats els paràmetres necessaris pel model matemàtic, com podria ser la distància entre termoparells.

Per tal que els termoparells puguin entrar dins el material, hi ha uns forats fets a la paret lateral de mica dels compartiments, tal i com es pot veure a les Figures 3 i 5. Aquests forats, fets amb una agulla, es troben en unes posicions concretes per tal de tenir controlades les seves posicions. A l'inici (la zona més pròxima a la resistència o "cara calenta") hi ha més densitat de termoparells, dit en altres paraules, els 5 primers termoparells (del T1 al T5) es troben més pròxims els uns als altres, i entre els termoparells restants, del T6 al T10, es troben més separats. Els forats es van fer inicialment amb la intenció que els 5 primers estiguessin separats 1mm entre ells (des dels 0mm als 5mm hi hauria els 5 primers termoparells), i els altres separats 3mm entre ells, sumant així fins als 20mm totals del compartiment de material, tal i com es mostra als plànols. Tot i així, per les pròpies imprecisions del muntatge, i que les puntes dels termoparells no queden totalment rectes, les mesures es van fer a partir de

diverses imatges des de diversos angles i utilitzant l'AutoCAD. D'aquesta manera es van obtenir les posicions reals dels termoparells dins el material d'assaig, les quals es descriuen a la Figura 7 i a la Taula 2.

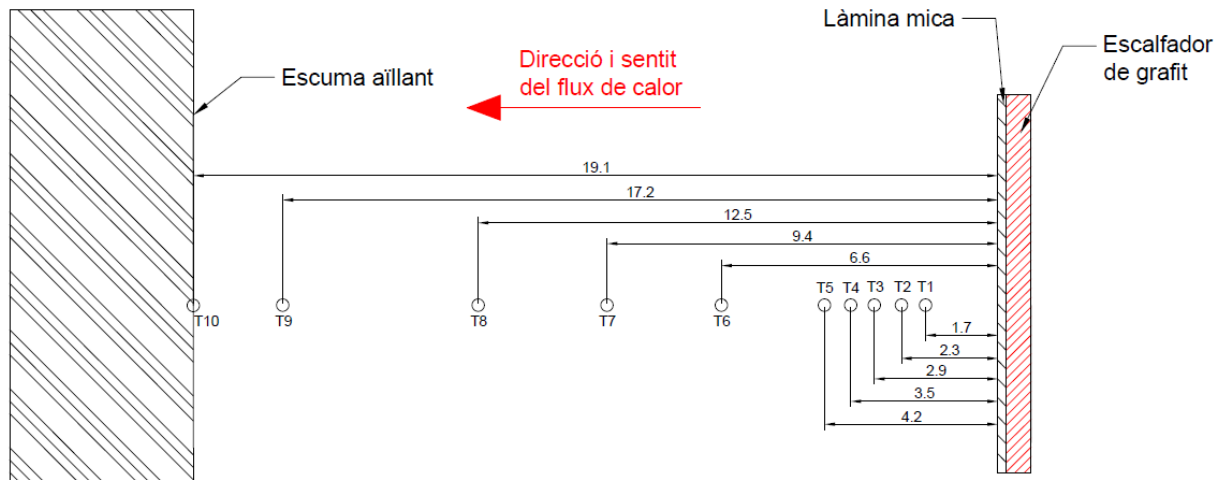


Figura 7.- Croquis de les posicions mesurades de les puntes dels termoparells dins el compartiment pel material d'assaig, entre la capa de mica i l'aïllant.

Termoparell	Posició respecte cara calenta
T1	1.7 mm
T2	2.3 mm
T3	2.9 mm
T4	3.5 mm
T5	4.2 mm
T6	6.6 mm
T7	9.4 mm
T8	12.5 mm
T9	17.2 mm
T10	19.1 mm

Taula 2.- Taula de la posició mesurada de cada termoparell. També s'han utilitzat aquestes posicions per fer les simulacions teòriques.



Figura 8.- Imatge del muntatge on es poden observar les puntes dels termoparells, situats al suport per tal de posicionar-los.

Per tal que els termoparells no es moguin a l'hora de posar el material al compartiment, hi ha el posicionador de termoparells (6), que és una làmina de mica que es situa al centre del compartiment pel material. Aquest posicionador es pot observar clarament a les Figures 2, 3, 5 i 8.

4.2.- Sistema d'alimentació

Per l'experiment és necessari un sistema d'alimentació per la resistència escalfadora de grafit. Aquesta alimentació es fa mitjançant una font d'alimentació variable per tal de poder ajustar els valors de tensió, intensitat i, per tant, la potència aplicada a l'escalfador segons l'experiment que es vulgui fer. Per tal de poder controlar la duració dels polsos de calor s'utilitza una placa tipus Arduino UNO amb un circuit que activa/desactiva un relé. D'aquesta manera s'obre i es tanca el circuit elèctric d'alimentació segons la duració establerta. A la Figura 9 es pot observar una imatge del cablejat d'alimentació i del d'adquisició de dades al laboratori. A la Figura 10 es pot veure un esquema més clar de l'alimentació i l'adquisició de dades.

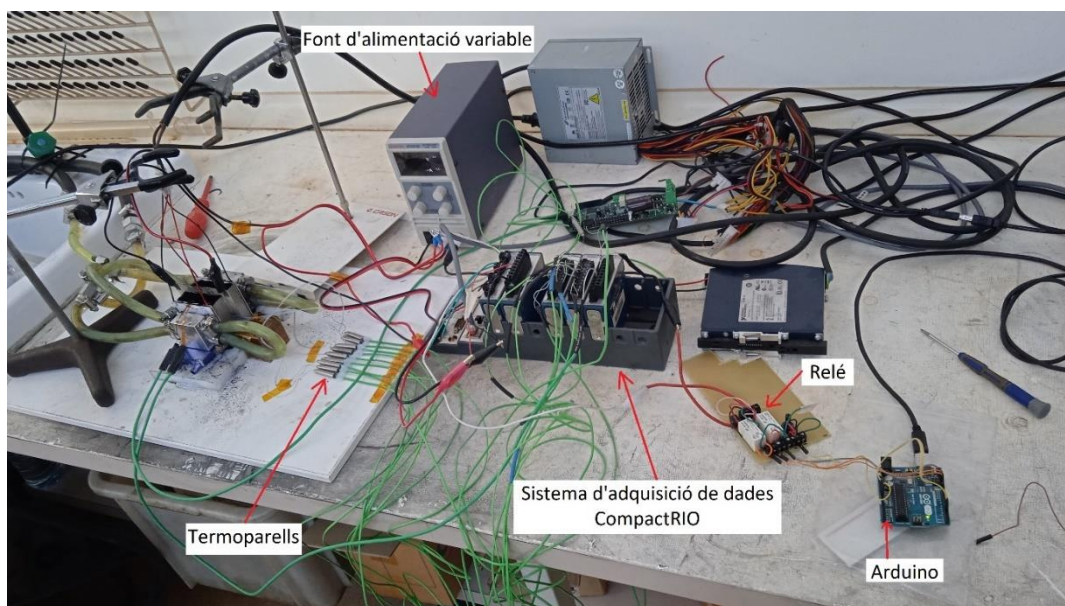


Figura 9.- Imatge del muntatge al laboratori, on es poden observar els components electrònics.

4.3.- Sistema d'adquisició de dades

Per tal d'adquirir les dades necessàries és indispensable un sistema d'adquisició electrònic. Les dades a mesurar són: temperatures dels termoparells (10 termoparells) i també la intensitat, tensió i potència aplicades a la resistència escalfadora de grafit.

S'ha utilitzat un sistema d'adquisició de dades CompactRIO i el programari LabView en un ordinador per tal de gravar les lectures. S'han programat les diverses entrades dels mòduls: els 10 termoparells es connecten a les entrades de tres mòduls de lectura de temperatures. Pel que fa a la intensitat, cal mesurar-la en sèrie respecte el sistema d'alimentació de l'escalfador, i s'utilitza un mòdul de lectura d'intensitats. Per mesurar la tensió, es fa amb una connexió en paral·lel, i es connecta amb un mòdul de lectura de tensió. Finalment, per la potència, el propi programa d'adquisició de dades s'ha programat per fer la multiplicació entre la intensitat i la tensió, d'aquesta manera es troba la potència elèctrica aplicada a l'escalfador. Es pot observar el sistema d'adquisició de dades utilitzat al laboratori a la Figura 9, a l'esquema del muntatge de la Figura 1, i a l'esquema de les connexions dels mòduls de lectura d'intensitat i de voltatge a la Figura 10.

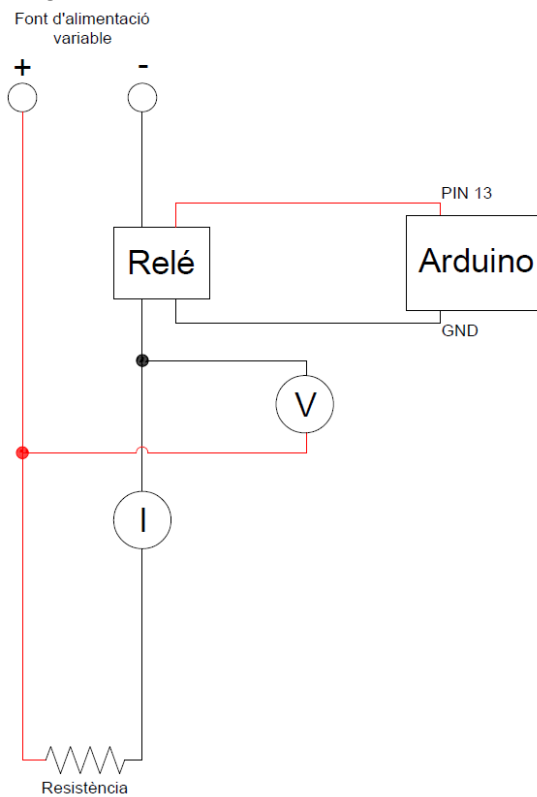


Figura 10.- Croquis del sistema d'alimentació i de la connexió dels mòduls de lectura de voltatge (V) i intensitat (I).

Els errors de lectura del sistema d'adquisició de dades depèn del mòdul de lectura, segons el fabricant són els següents:

	Error
Mòdul lectura termoparells	+/- 0.6°C
Mòdul lectura intensitats	+/- 2.5%
Mòdul lectura tensions	+/- 0.26%

Taula 3.- Taula on es mostren els errors del sistema d'adquisició de dades segons el fabricant.

5.- ASSAJOS AL LABORATORI

5.1.- Elecció del material d'assaig

El material seleccionat pels assajos són els nanotubs de carboni (CNT). Aquest material està format per estructures tubulars compostes per capes d'àtoms de carboni agrupats en forma hexagonal, tal i com es mostra a la Figura 11. Les mesures característiques d'aquest material són el diàmetre i la longitud dels tubs.

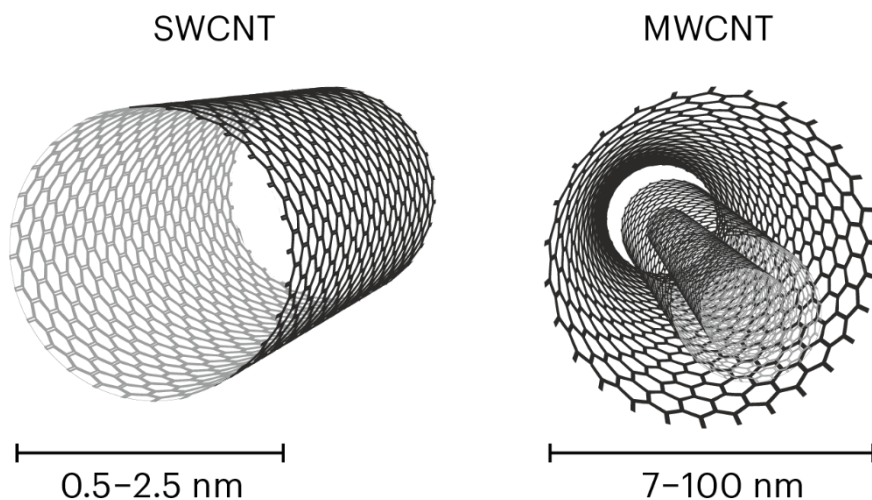


Figura 11.- Imatge representativa de l'estructura dels Single-Walled Carbon NanoTubes (SWCNT) i dels Multi-Walled Carbon NanoTubes (MWCNT). (<https://tuball.com/articles/multi-walled-carbon-nanotubes>)

Per escollir aquest material, des del grup de recerca ens vam basar en els resultats de diversos estudis publicats per altres autors. Principalment de dos articles diferents, amb la conclusió dels quals s'obra la porta a la utilització d'aquest material en generadors termoelèctrics.

En el primer article^[2] s'experimenta amb agregats de nanotubs de carboni per caracteritzar les seves propietats de transport tèrmic. Aquest article aplica el model de Cattaneo-Vernotte (explicat en aquest treball a l'apartat 2.2), i experimentalment els autors van obtenir un valor de desfasament de 230 segons. Aquest valor és elevat en comparació amb la majoria de materials. El propi article acaba amb la conclusió que aquesta característica pot tenir aplicacions útils en convertors termoelèctrics, ja que significa que el flux de calor necessari en casos transitoris per a generar una diferència de temperatura és molt menor que el necessari en casos estacionaris. Es podria aprofitar aquest fenomen per, a partir de polsos de

calor, generar diferències de temperatura utilitzant un flux menor que el necessari en casos estacionaris. Com que el valor del voltatge termoelèctric és proporcional a la diferència de temperatura, significaria que amb aquests polsos transitoris podríem generar la mateixa potència elèctrica amb menys flux de calor (menys energia tèrmica).

En el segon article^[3] mesura la conductivitat tèrmica i la potència termoelèctrica de nanotubs de carboni en diverses disposicions. Una de les conclusions és que una xarxa tridimensional de nanotubs de carboni orientats de manera aleatòria té una conductivitat tèrmica de l'ordre d'unes 1000 vegades menor a la conductivitat d'un sol nanotub. També descriu que la potència termoelèctrica no es veu afectada per la pressió aplicada al material, i que aquesta potència hauria de disminuir si el diàmetre dels nanotubs augmenta. El fet que la conductivitat tèrmica sigui baixa implica que els nanotubs de carboni puguin tenir aplicacions com a aïllants i com a generadors termoelèctrics.

Veient les conclusions dels dos articles mencionats, el grup de recerca va decidir que els nanotubs de carboni (CNT) poden tenir les propietats adequades per millorar el rendiment dels generadors termoelèctrics mitjançant fluxos de calor transitoris. Per aquest motiu s'ha decidit experimentar amb aquest material i, mitjançant aquest TFG, obtenir els valors dels desfasaments duals per tal de poder aplicar les propietats dels CNT al model teòric que estan desenvolupant.

Les característiques del CNT escollit pels assajos, segons el fabricant, són les següents:

Tipus	Multi-Walled (MWNT)
Diàmetre extern (Outer Diameter)	20-40 nanòmetres
Longitud (Length)	10-30 micròmetres
Puresa	>95%

Taula 4.- Dades dels nanotubs de carboni utilitzats pels assajos

5.2.- Metodologia d'assaig al laboratori

Un cop realitzat el muntatge al laboratori, el procediment de l'experiment per obtenir els valors de desfasament τ_T i τ_q és el següent:

- Col·locació del material a assajar dins els dos compartiments del muntatge. Un cop posat el material, fer vibrar el muntatge per tal d'eliminar possibles bosses d'aire i inhomogeneïtats que puguin alterar els resultats.

- Encendre i calibrar la font d'alimentació de l'escalfador al voltatge necessari per l'experiment i fixar la duració del pols de calor al programa de la placa Arduino.
- Activar la gravació del sistema d'adquisició de dades, obtenint així les diverses temperatures dels termoparells i la intensitat, voltatge i potència del circuit d'alimentació de l'escalfador.
- Activar el pols de calor amb l'Arduino, i deixar una estona l'assaig sense cap estímul per tal d'obtenir les corbes d'evolució de la temperatura dels diversos termoparells durant tot el règim transitori. S'enregistraven les dades fins que totes les corbes tornessin a llegir la mateixa temperatura, amb un marge de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ (nivell en el que les corbes ja es trobaven estables). Quan s'arribava a aquest marge entre el termoparell amb la lectura més alta i la més baixa, s'aturava la gravació de dades, ja que no era necessari tenir més dades.
- Exportar les dades enregistrades a format ".csv" o ".xlsx" a través del LabView.

Posteriorment es realitza el tractament de les dades fins a obtenir els resultats finals. El procediment i metodologia del tractament de dades es descriu a l'apartat 6 d'aquest treball.

Els experiments realitzats al laboratori per aquest TFG es descriuen a la següent taula:

Data	Material	Pols aplicat (voltatge i duració)	Comentaris
19/12/2022	CNT	10 Volts – 5 segons	3 repeticions, muntatge no aïllat
19/12/2022	CNT	15 Volts – 5 segons	3 repeticions, muntatge no aïllat
03/03/2023	CNT	10 Volts – 5 segons	3 repeticions, muntatge aïllat
06/03/2023	CNT	15 Volts – 5 segons	3 repeticions, muntatge aïllat
06/03/2023	CNT	20 Volts – 5 segons	3 repeticions, muntatge aïllat

Taula 5.- Taula dels assajos realitzats per aquest treball. Les dades del 19/12/23 no s'han utilitzat pels resultats finals ja que el muntatge no estava aïllat.

6.- MODEL MATEMÀTIC

6.1.- Model matemàtic Dual-Phase Lag

És necessari desenvolupar un model matemàtic amb el qual, a partir d'unes condicions inicials, les dades del pols de calor aplicat, el model teòric de desfasaments duals, i les dades experimentals de temperatura segons posició i temps, es puguin trobar els valors dels dos desfasaments (τ_t i τ_q) amb un error mínim.

Per fer-ho, el grup de recerca ha generat un codi en Fortran, al qual se li introdueixen les dades tèrmiques característiques del material, conjuntament amb el valor dels desfasaments, capaç de representar la corba de temperatura en funció del temps a la posició del termoparell que es vol analitzar. Un cop s'obté la corba dels punts teòrics, es pot analitzar l'error respecte la corba experimental, i posteriorment es pot dur a terme un procés iteratiu donant nous valors de desfasament per tal d'aconseguir el millor ajust entre la corba teòrica i la corba experimental.

El model matemàtic del programa està basat en el model de desfasaments duals, explicat a l'apartat 2.2 del treball.

Pel model d'aquest experiment, s'assumeix que és un problema en una dimensió, ja que els termoparells es troben tots al mateix eix, just al centre del muntatge, on es poden considerar els efectes exteriors com a negligibles.

Per trobar la representació de la T, cal combinar l'Equació 5 amb l'Equació 7, les quals es recorden a continuació.

$$-\nabla \cdot \vec{q}(\vec{r}, t) + Q(\vec{r}, t) = C_p \frac{\partial T}{\partial t}(\vec{r}, t) \quad (\text{Eq.5})$$

$$\vec{q}(\vec{r}, t) + \tau_q \frac{\partial \vec{q}}{\partial t}(\vec{r}, t) \cong -k \left\{ \nabla T(\vec{r}, t) + \tau_T \frac{\partial}{\partial t} [\nabla T(\vec{r}, t)] \right\} \quad (\text{Eq.7})$$

Abans de combinar-les, però, per trobar l'equació que ens doni la T, s'ha d'eliminar el flux de calor (\vec{q}) de les dues equacions. Per l'Equació 7, es troba la divergència de l'equació assumint propietats tèrmiques constants. El resultat és l'Equació 8, que es mostra a continuació.

$$\nabla \cdot \vec{q} + \tau_q \frac{\partial}{\partial t} [\nabla \cdot \vec{q}] = -k \nabla^2 T - k \tau_T \frac{\partial}{\partial t} [\nabla^2 T] \quad (\text{Eq. 8})$$

Un cop hem trobat la divergència amb l'Equació 8, per tal d'eliminar el terme $\nabla \cdot \vec{q}$ es pot combinar l'Equació 8 amb l'Equació 5 utilitzant la forma següent de l'Equació 5: $\nabla \cdot \vec{q} = Q - C_p \frac{\partial T}{\partial t}$ i introduint la difusivitat tèrmica $\alpha = \frac{k}{c_p}$.

Posteriorment s'obté la següent forma, que ens permetrà més endavant obtenir la T:

$$\nabla^2 T + \tau_T \frac{\partial}{\partial t} [\nabla^2 T] + \frac{1}{k} [Q + \tau_q \frac{\partial Q}{\partial t}] = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\tau_q}{\alpha} \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} \quad (\text{Eq. 9})$$

A continuació, per simplificar l'equació i poder-la aplicar a l'experiment, es pot considerar que al nostre experiment no hi ha generació de calor dins el propi material (Q), per tant, es pot eliminar una part de l'equació, quedant de la següent manera:

$$\nabla^2 T + \tau_T \frac{\partial}{\partial t} [\nabla^2 T] = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\tau_q}{\alpha} \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} \quad (\text{Eq. 10})$$

Aquesta és l'equació que s'utilitzarà per trobar la solució de la temperatura, però abans cal aplicar-li les següents condicions inicials i de contorn:

El flux de calor emès des de la posició $x=0$, ha de complir:

$$q = \begin{cases} q_s & \text{si } 0 \leq t \leq t_s \\ 0 & \text{en qualsevol altre cas} \end{cases} \quad (\text{Eq.11})$$

On q_s és la potència del flux de calor aportat pel pols (W/m^2), i t_s és el temps de duració del pols (segons).

Per tant, es considera que el pols de calor (o pertorbació del sistema) és en forma d'esglaió unitari de valor q_s , i s'inicia en temps 0 i finalitza a temps t_s .

També es considera que la zona on hi ha els termoparells està aïllada de l'exterior, per fer-ho es té en compte que $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$ a la posició $x = l$ (la posició final), per tant, el final es considera perfectament aïllat.

La resta de condicions inicials de contorn són: $\mathbf{T}(\mathbf{x}, \mathbf{0}) = \mathbf{T}_0$ i $\partial \mathbf{T} / \partial t(\mathbf{x}, \mathbf{0}) = \mathbf{0}$ que signifiquen que la temperatura a temps inicial és coneguda i estable. Per tant, es pot dir que $\mathbf{q}(\mathbf{x}, \mathbf{0}) = \mathbf{0}$, o sigui que a temps inicial no hi ha cap pertorbació amb un flux de calor, el comportament de tot el muntatge és estacionari. En el nostre cas, abans de fer els experiments, s'ha deixat el material sense cap pertorbació durant les 24h prèvies. Posteriorment, un cop coneguda l'Equació 10 i les condicions inicials i de contorn del problema, es pot trobar l'equació de governança a través de la transformada de Laplace, que ens representa la temperatura del sistema de l'experiment:

$$\bar{T}(x; p) = D_1 e^{-Ax} + D_2 e^{Ax} \quad (\text{Eq.12})$$

On:

$$D_1 = \frac{\bar{q}_b \alpha}{k} \frac{A}{p(1-e^{-2Al})} \quad A = \sqrt{\frac{p(1+p\tau_q)}{\alpha(1+p\tau_T)}}$$

$$D_2 = D_1 e^{-2Al} \quad \bar{q}_b = \frac{q_s(1-e^{-pt_s})}{p}$$

t_s és el temps de duració del pols de calor, l és la posició de la cara final (cara freda), i p és l'operador de la transformada de Laplace (sovint també "s").

Per tal de fer la inversió de la solució transformada, es pot utilitzar l'aproximació per la suma de Riemann, obtenint la següent solució:

$$T(x, t | \tau_T, \tau_q) = \frac{e^{\gamma t}}{t} \left[\frac{\bar{T}(x, \gamma)}{2} + \text{Re} \sum_{n=1}^N (-1)^n \bar{T}(x; \gamma + \frac{in\pi}{t}) \right]_{\tau_T, \tau_q} \quad (\text{Eq. 13})$$

El paràmetre gamma (γ), que és una constant que apareix al fer la inversa de Laplace amb nombres complexos, s'anomena també "Bromwich Contour", i tal com indica D.Y Tzou en el seu model, es pot aproximar a $4.7/t$ (unitats en s^{-1}) per tal que els càlculs convergeixin. El símbol "i" representa la part imaginària i "Re" representa la part real del sumatori.

I l'error respecte el valor experimental, per desviació mitjana, és:

$$E(\tau_T, \tau_q) = \frac{\sum_{i=1}^M |T_{DPL}(x_i, t_i; \tau_T, \tau_q) - T_{exp}(x_i, t_i)|}{M} \quad (\text{Eq. 14})$$

On T_{DPL} és el valor de temperatura obtingut al model teòric (Dual-Phase-Lag) tenint en compte la posició, temps i els desfasaments i T_{EXP} és el valor de temperatura experimental a una posició i un temps.

7.- PROCESSAT DE DADES

7.1.- Error i exactitud de les mesures

7.1.1.- Temperatura

Pel que fa a les lectures de temperatura, es té un error absolut de +/- 1.5°C. Aquest error està compost per l'error dels termoparells, de +/- 0.9°C segons el fabricant, i l'error del mòdul de lectura de temperatures, de +/- 0.6°C.

7.1.2.- Potència

La potència s'ha calculat a partir de la multiplicació de la lectura de tensió i la d'intensitat. El mòdul de lectura d'intensitat té un error de +/- 2.5%, i el de tensió de +/- 0.26%. Si es fa la propagació de l'error de la multiplicació d'intensitat i tensió, s'obté un error de les lectures de potència de +/- 2.76%. A la Taula 10 s'especifiquen els rangs de potència utilitzats a les simulacions, que inclouen els marges d'error de +/- 2.76%.

7.1.3.- Metodologia tractament d'error

Pel que fa a la temperatura, per tal de considerar l'error absolut de +/- 1.5°C de les lectures de temperatura, s'ha calculat l'error relatiu que suposen aquests +/-1.5°C respecte la temperatura absoluta. Per exemple, a l'assaig 1 a 10V, pel termoparell 1 s'inicia el pols de calor a una temperatura de 17.2°C. El que s'ha fet és calcular l'error relatiu respecte aquesta temperatura: $(1.5 / 17.2) * 100 = 8.72\%$. Posteriorment, un cop calculat aquest error, s'ha modificat la corba experimental per tal d'incloure el marge d'error, o sigui que s'ha obtingut una corba amb la lectura experimental + 8.72% i una altra corba amb la lectura experimental - 8.72%. S'han utilitzat aquestes corbes per aplicar-hi les simulacions teòriques del model DPL i d'aquesta manera s'han obtingut els valors dels desfasaments tenint en compte l'error de lectura.

Assaig	Temperatura inicial (°C)	% Error relatiu lectura termoparells
10 Volts – Assaig 1	17.2 °C	8.72 %
10 Volts – Assaig 2	17.7 °C	8.47 %
10 Volts – Assaig 3	17.8 °C	8.43 %
15 Volts – Assaig 1	14.8 °C	10.14 %
15 Volts – Assaig 2	17.0 °C	8.82 %
15 Volts – Assaig 3	17.5 °C	8.57 %
20 Volts – Assaig 1	16.9 °C	8.88 %
20 Volts – Assaig 2	17.9 °C	8.38 %
20 Volts – Assaig 3	19.1 °C	7.85 %

Taula 6.- Taula amb els valors de temperatura inicial dels assajos, i el percentatge que representa l'error absolut d'1.5°C.

El motiu pel qual s'ha escollit la temperatura d'inici del pols és a causa que és la temperatura mínima de la corba experimental, per aquesta raó, serà on hi hagi l'error relatiu màxim.

Per tal de simplificar el procés de consideració de l'error a les taus (ja que cada vegada que es considera l'error de temperatura, es dupliquen les corbes de temperatura i les simulacions a considerar), s'ha aplicat l'error de lectura de temperatures als termoparells T1 i T7 de cada assaig. S'han construït les corbes amb l'error, s'han executat les simulacions per tal de trobar els desfasaments, i posteriorment s'ha quantificat la variació dels desfasaments entre les corbes amb error positiu i amb error negatiu. D'aquesta manera s'ha pogut observar com l'error de lectura de temperatura afecta als valors de desfasament i s'ha calculat quin percentatge representa aquesta variació respecte el valor del desfasament. Per la resta de termoparells, s'ha aplicat la mitjana de l'error de T1 i de T7 a cada assaig realitzat.

Pel que fa a la potència, senzillament s'ha aplicat el marge d'error de +/- 2.76% als valors de potència utilitzats a les simulacions teòriques DPL.

7.2.- Metodologia de processament de dades

Un cop realitzats els experiments al laboratori, és necessari processar les dades obtingudes per tal de poder aplicar-hi el model matemàtic explicat anteriorment i aconseguir obtenir uns resultats. En aquest apartat es descriu la metodologia que s'ha seguit des de les dades "en brut" del laboratori fins a obtenir els resultats finals que s'exposaran a l'apartat de resultats i conclusions. Per tal d'obtenir una visió més clara del procés, s'adjunta el següent diagrama de flux:

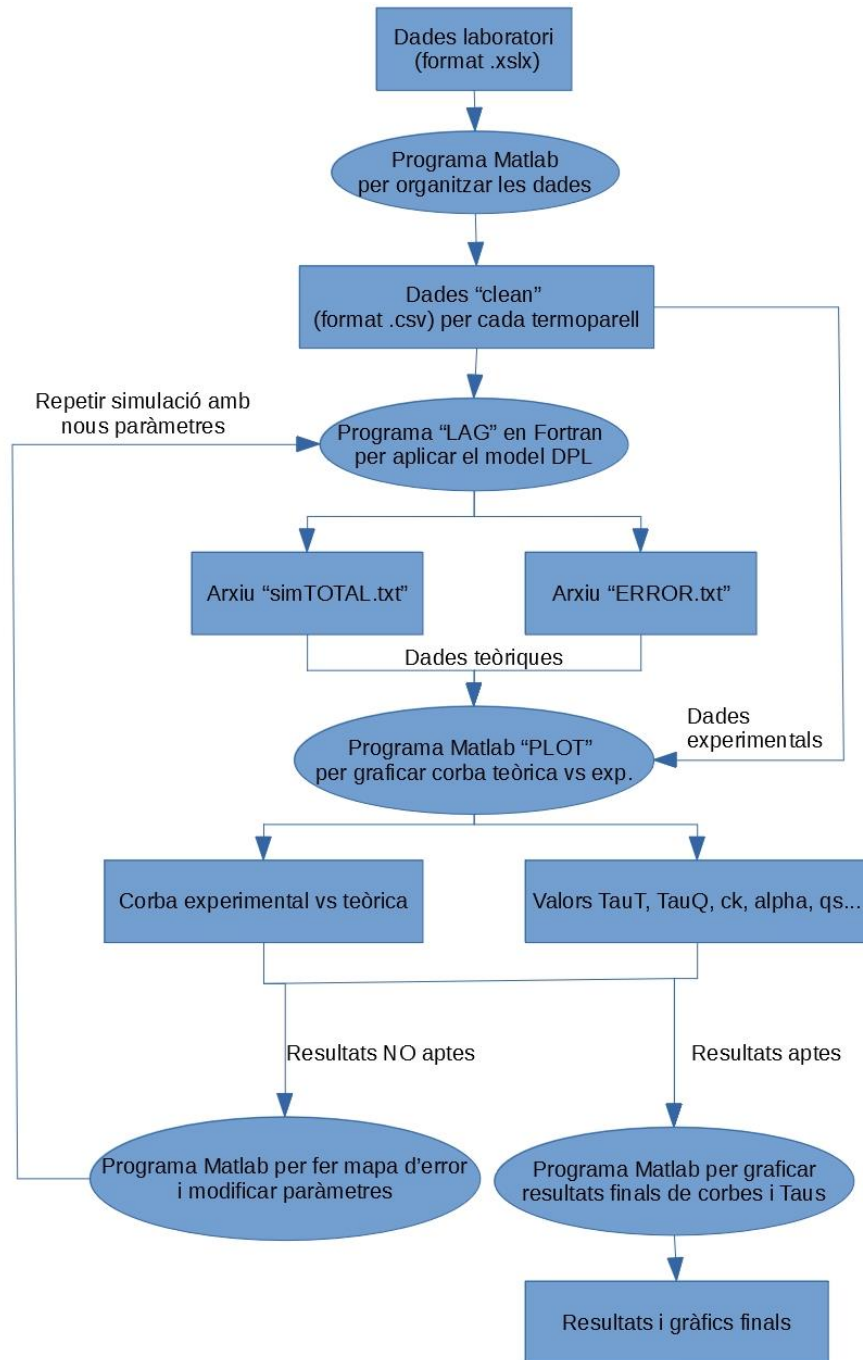


Figura 12.- Esquema del procediment de processat de dades des de les dades experimentals fins als resultats finals.

Al laboratori es van obtenir les dades experimentals (temperatura dels termoparells, temps, voltatge, intensitat i potència) en format “.xlsx” a través d’un sistema d’adquisició i del programa LabView.

El primer pas és separar les dades de cada termoparell, detectar el punt d’inici del pols, i posar els valors de temperatura referenciats de manera relativa al punt d’inici del pols. Això es fa amb un programa de Matlab que, a partir de les dades tèrmiques i elèctriques, genera un arxiu format “.csv” per a cada termoparell, on la temperatura s’inicia a 0°C en el moment d’aplicació del pols de calor. En el cas dels termoparells T1 i T7, en aquest pas, s’aplica el procediment explicat a l’apartat de tractament d’error per tal de generar dues corbes de cada lectura del laboratori, i així considerar l’error de lectura dels termoparells i del sistema d’adquisició.

El següent pas és aplicar el model Dual-Phase Lag (“DPL”) per tal d’obtenir les corbes teòriques i posteriorment poder comparar-les amb les corbes experimentals. El model DPL s’aplica amb un programa escrit en Fortran, desenvolupat inicialment per GREFEMA, i en el que he pogut col·laborar en la seva millora i correcció d’errors durant la realització d’aquest treball. Aquest programa realitza el procediment explicat a l’apartat de model matemàtic d’aquest treball. A partir de les dades del material (conductivitat tèrmica “ck” i difusivitat tèrmica “alpha”), de la posició del termoparell mesurada al laboratori, de la potència del flux de calor aplicat a l’experiment, i dels rangs de TauT i TauQ en els que es vol fer el càlcul, el programa realitza un procés iteratiu de càlcul on aplica les fórmules matemàtiques explicades anteriorment per tal de trobar la temperatura teòrica en un temps concret, d’un punt concret, amb unes condicions inicials i de material concretes. Aquest programa de Fortran, genera dos arxius en format “.txt”, un s’anomena “simTOTAL.txt”, que és on hi ha els resultats de la simulació i les dades tenen la següent estructura de taula:

Temps	Posició	Temp.	Q	τ_q	τ_T	ck	alpha	Qs
0.800	1.74E-03	1.47E-03	0.00	1024.0	178.8	0.388	8.45E-07	2358.0
1.200	1.74E-03	2.09E-02	0.00	1024.0	178.8	0.388	8.45E-07	2358.0
...

Taula 7.- Taula d'exemple de la disposició de les dades dins l'arxiu “simTOTAL.txt”.

I l’altre arxiu s’anomena “ERROR.txt”, on hi apareix l’error entre valors teòrics i experimentals segons les taus i els altres paràmetres amb la següent forma:

Error	τ_q	τ_T	ck	alpha	Posició	qs
0.13563	1024.0	178.8	0.388	8.450E-07	1.74E-03	2358.0
0.12895	1024.0	179.0	0.388	8.450E-07	1.74E-03	2358.0
...

Taula 8.- Taula d'exemple de la disposició de les dades dins l'arxiu “ERROR.txt”.

L'estratègia que s'ha seguit a l'hora de fer les simulacions és començar amb rangs de taus grans, i posteriorment anar acotant el rang a la zona d'error mínim i augmentar la precisió i resolució del càlcul.

Un cop obtinguts els resultats teòrics i experimentals, vaig desenvolupar des de zero un programa Matlab per tal de representar gràficament ambdues corbes i així poder comparar-les i veure de manera més gràfica i visual els resultats obtinguts. El que fa el programa és detectar el valor d'error mínim a l'arxiu "ERROR.txt", llavors emmagatzema els valors de τ_q , τ_T , ck, alpha, posició i qs. Posteriorment busca els valors a l'arxiu "simTOTAL.txt", emmagatzema el temps i la temperatura de la simulació corresponent a aquells paràmetres, i posteriorment grafica els punts de la simulació teòrica i la corba experimental. A continuació s'adjunta un exemple d'una corba graficada pel programa:

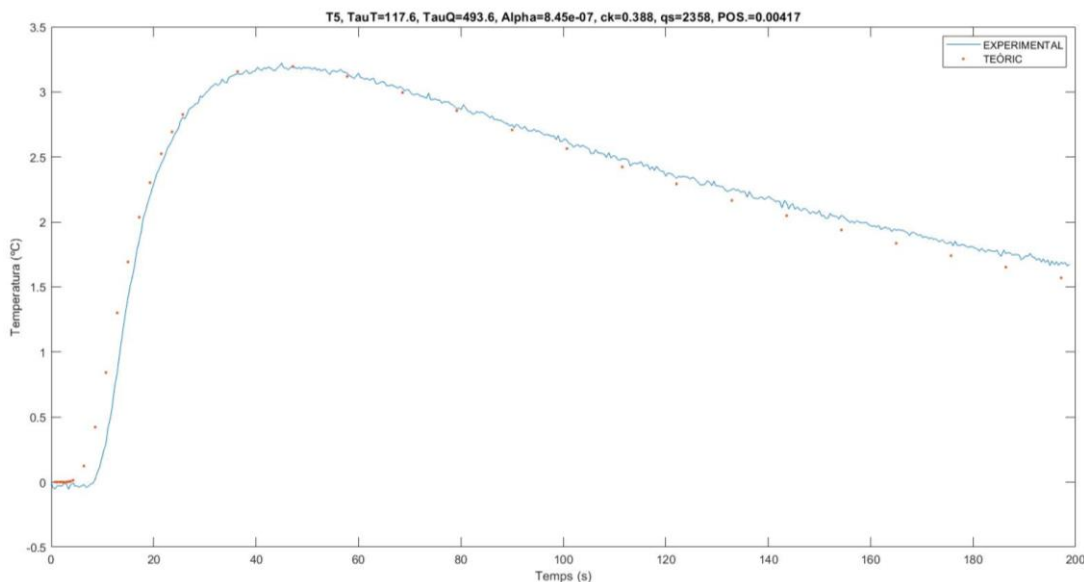


Figura 13.- Imatge on es mostra el gràfic de valors teòrics i experimentals generat pel programa de Matlab.

A partir de la gràfica es pot veure si els valors teòrics i experimentals coincideixen. També serveixen d'indicadors els valors de l'error calculat. Per tal d'observar quina és la zona d'error mínim en funció de les "taus" he fet un programa de Matlab per fer un mapejat de l'error. El que fa el programa és buscar els paràmetres ck, alpha, posició i qs. Un cop té aquests valors, emmagatzema l'error del programa "ERROR.txt" de totes les combinacions de les "taus" que tinguin fixades les dades ck, alpha, etc. A continuació es mostra un exemple dels mapes d'error generats:

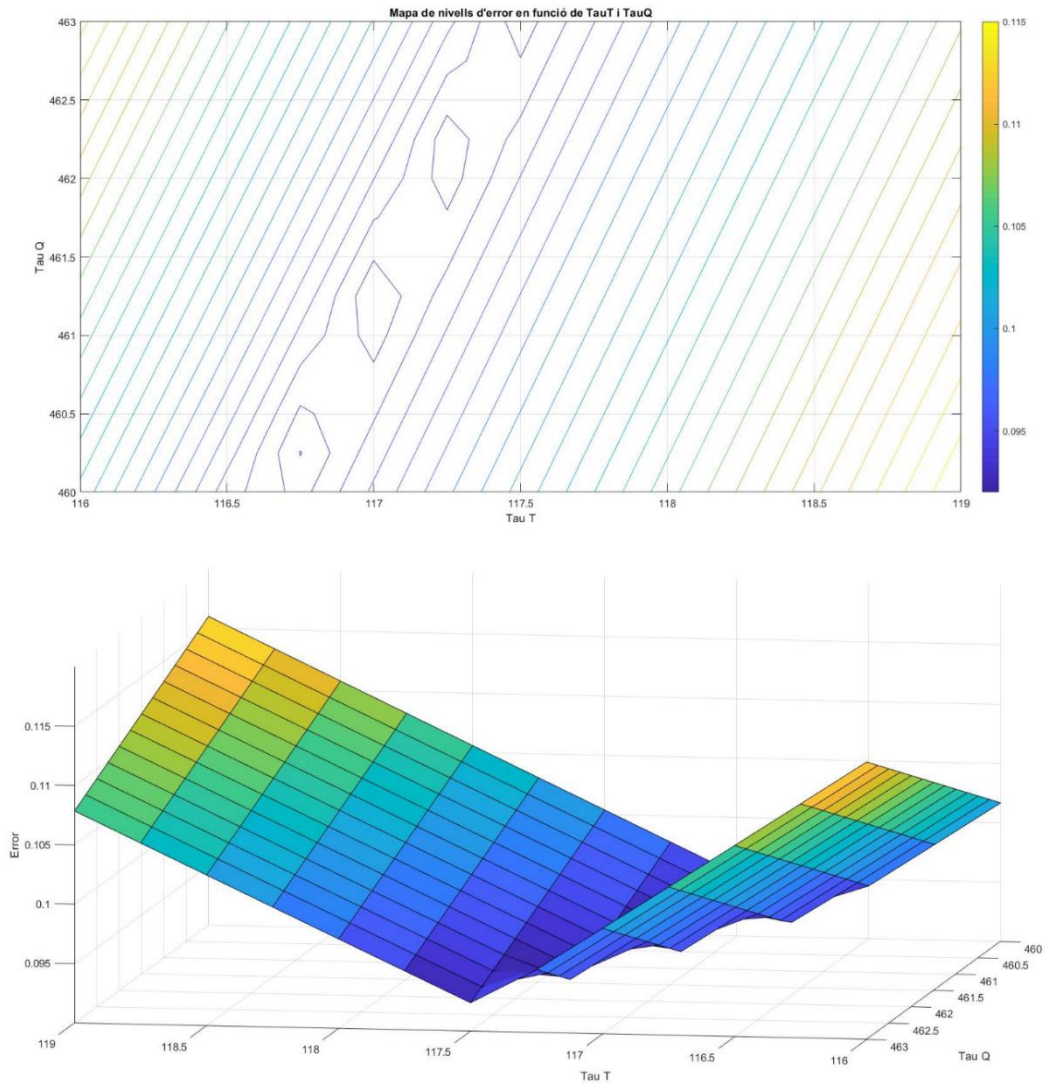


Figura 14.- Exemple de gràfics 2D i 3D d'error en funció de les "taus" generats pel Matlab.

Aquest programa ha estat molt útil ja que ha permès veure les zones on l'error disminueix i d'aquesta manera anar acotant els rangs de "taus" a la simulació per anar disminuint els intervals de les taus del càlcul. En cas d'obtenir corbes que no coincideixen amb les experimentals, o en que l'error o la precisió no és la desitjada, es torna a utilitzar el programa de Fortran "LAG", canviant els paràmetres per tal d'ajustar-se millor als resultats desitjats. Per tant, es tracta d'anar iterant fins a aconseguir trobar totes les corbes experimentals òptimes. Aquest és el procés que més temps ha consumit del treball, ja que es tracta d'un procés iteratiu de prova/error, fins anar acotant els valors ideals pel càlcul fins a trobar les corbes amb l'error mínim.

Un cop obtingudes les dades desitjades, s'utilitza un altre programa en Matlab que he realitzat per tal de representar gràficament els tres resultats experimentals i els tres teòrics en un sol

gràfic, d'aquesta manera es poden veure de manera més visual els resultats. A continuació s'adjunta un exemple:

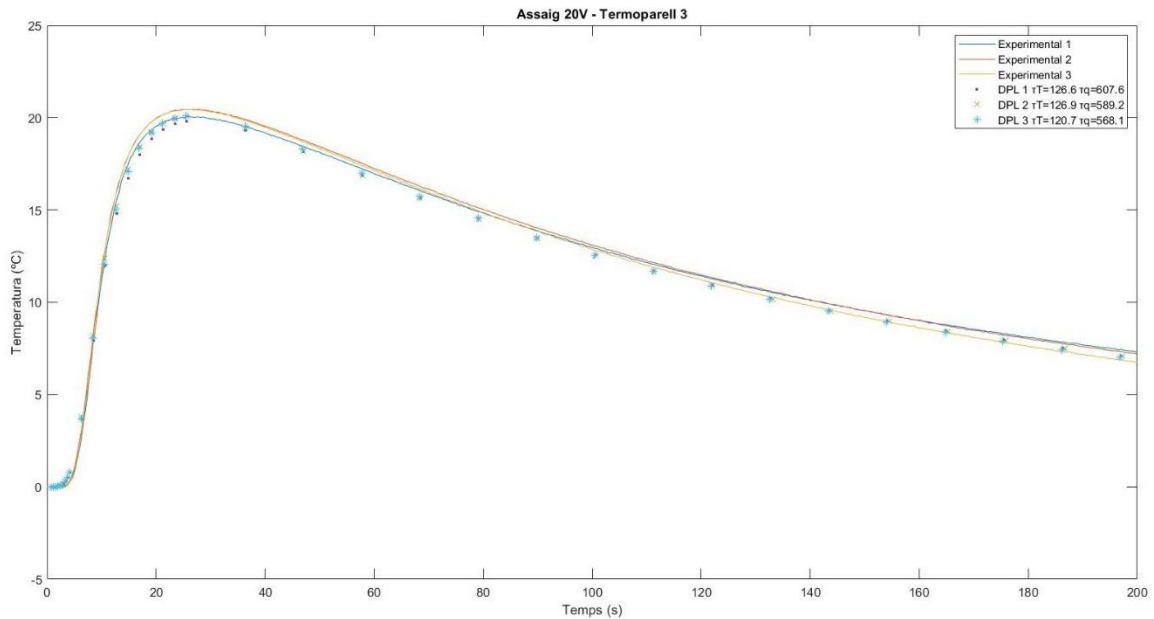


Figura 15.- Gràfic de les corbes 3 de temperatura experimentals obtingudes al laboratori i els punts obtinguts a les 3 simulacions teòriques respectives.

Finalment, un cop obtingudes i graficades totes les corbes, es tenen en compte els valors de "taus" per a cada cas. A partir dels termoparells T1 i T7, on s'ha considerat l'error de mesura de temperatura, s'ha obtingut l'error relatiu en cada assaig, i s'ha aplicat als altres valors de desfasament dels termoparells de T2 a T6, d'aquesta manera s'han obtingut els rangs de desfasament que es mostren a l'apartat de resultats.

Finalment, he fet un altre programa de Matlab per tal de representar gràficament els rangs de tau obtinguts en funció de la posició, tal i com es pot veure per exemple al gràfic desfasament-posició a la Figura 23 dels resultats.

8.- DADES, RESULTATS I CONCLUSIONS

8.1.- Dades i Resultats

8.1.1.- Dades utilitzades a les simulacions teòriques

Les dades de conductivitat i difusivitat del CNT que s'han utilitzat per les simulacions són les següents:

	Valor
Conductivitat tèrmica (ck)	0.388 W/(m*K)
Difusivitat tèrmica (alpha, α)	8.450e -07 m ² /s

Taula 9.- Taula dels valors de conductivitat i difusivitat tèrmiques utilitzats per les simulacions.

Aquests valors de conductivitat i difusivitat tèrmiques s'han obtingut a les simulacions. L'estratègia va ser variar els valors d'aquests paràmetres i trobar en quins valors coincidien millor els resultats del model amb els experimentals. Es buscava que els valors a temps més elevats (on teòricament ja no hi ha desfasament), coincidissin. Es van fer múltiples iteracions, i es van acabar trobant aquests dos paràmetres.

Posteriorment, un cop obtinguts els valors de la conductivitat tèrmica i la difusivitat tèrmica a través de les simulacions, es va fer un estudi per part del grup de recerca on s'aplicava el mètode que aplica W.L.V. Price a l'article [4] per tal de calcular aquestes dues propietats tèrmiques. Els resultats van ser satisfactoris, ja que els valors calculats són molt pròxims als valors obtinguts en el procés iteratiu. Per això, s'han considerat vàlids els valors de la Taula 7 per a les simulacions.

Les potències per unitat de superfície del flux de calor obtingudes als experiments, i utilitzades a les simulacions són les següents:

Assaig	Rang de potència
10 Volts – Assaig 1	2293 W/m ² – 2423 W/m ²
10 Volts – Assaig 2	2258 W/m ² – 2386 W/m ²
10 Volts – Assaig 3	2194 W/m ² – 2318 W/m ²
15 Volts – Assaig 1	5442 W/m ² – 5750 W/m ²
15 Volts – Assaig 2	5502 W/m ² – 5814 W/m ²
15 Volts – Assaig 3	5487 W/m ² – 5798 W/m ²
20 Volts – Assaig 1	10413 W/m ² – 11004 W/m ²
20 Volts – Assaig 2	10545 W/m ² – 11143 W/m ²
20 Volts – Assaig 3	10555 W/m ² – 11153 W/m ²

Taula 10.- Taula amb els rangs de potència per unitat de superfície obtinguts a partir de les dades elèctriques de cada assaig, aquests rangs inclouen l'error de +/- 2.76%.

Les posicions dels termoparells que s'han utilitzat a les simulacions són les que s'han indicat a la Taula 2.

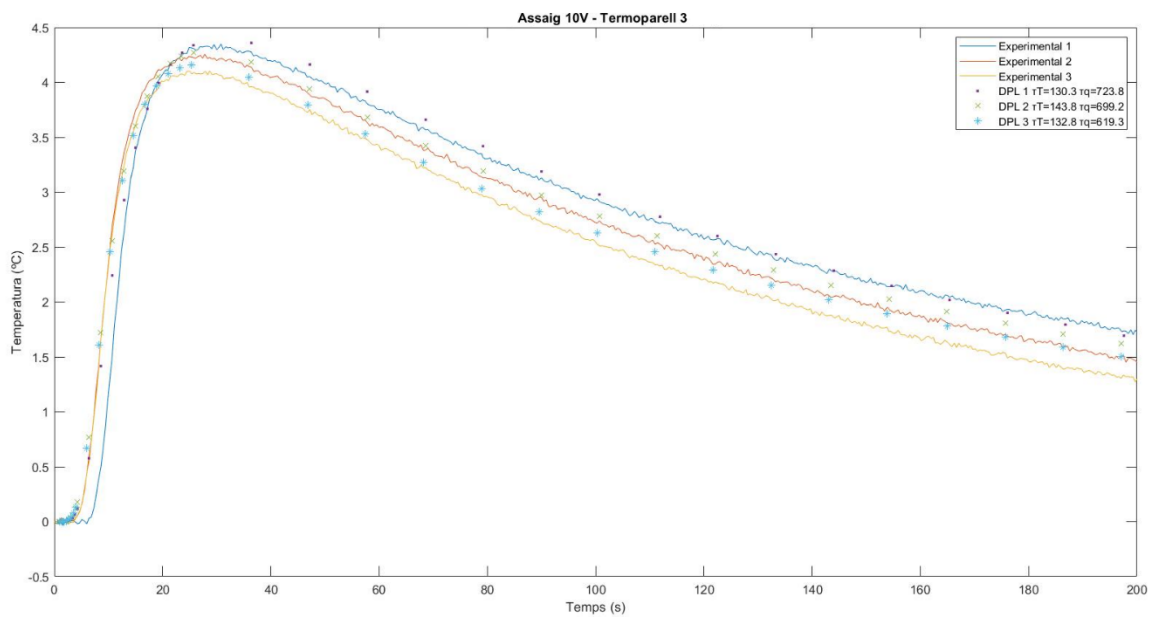
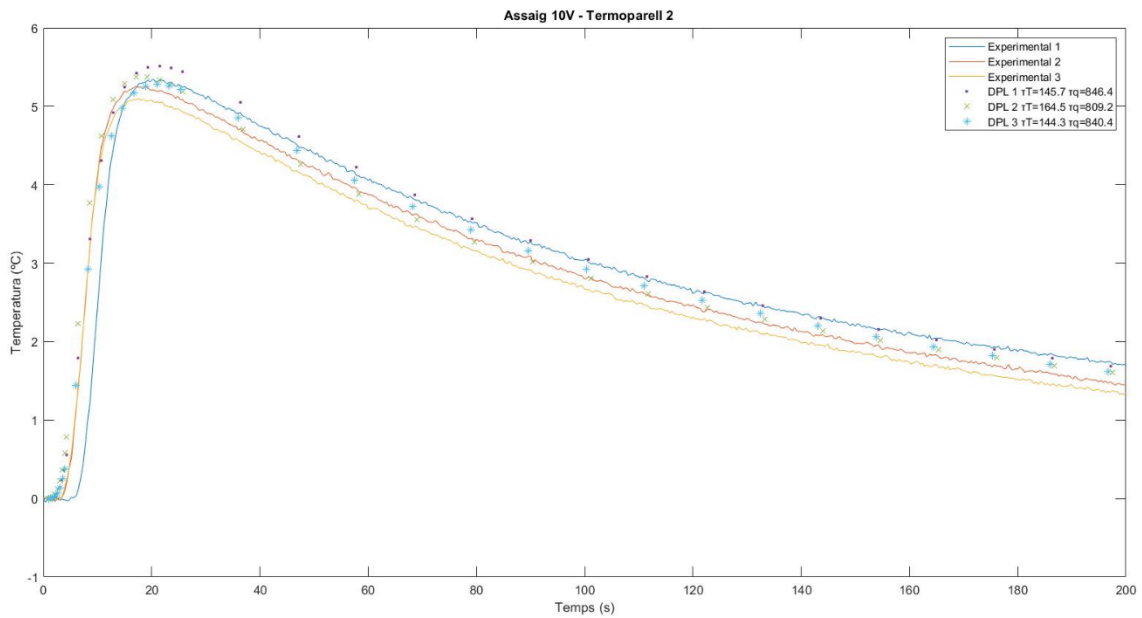
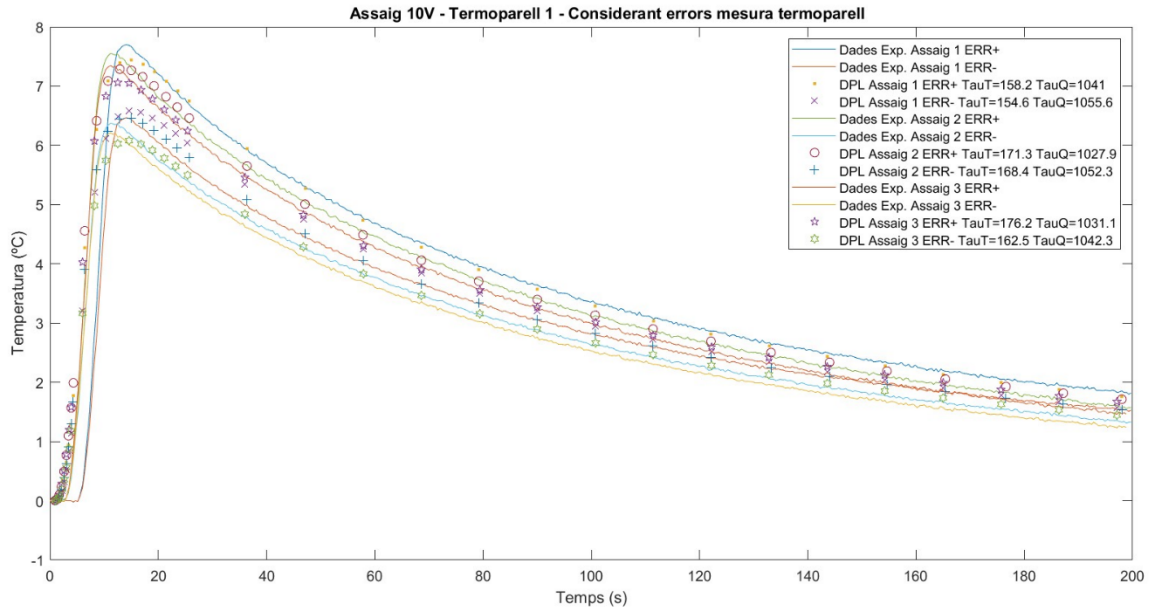
8.1.2.- Resultats

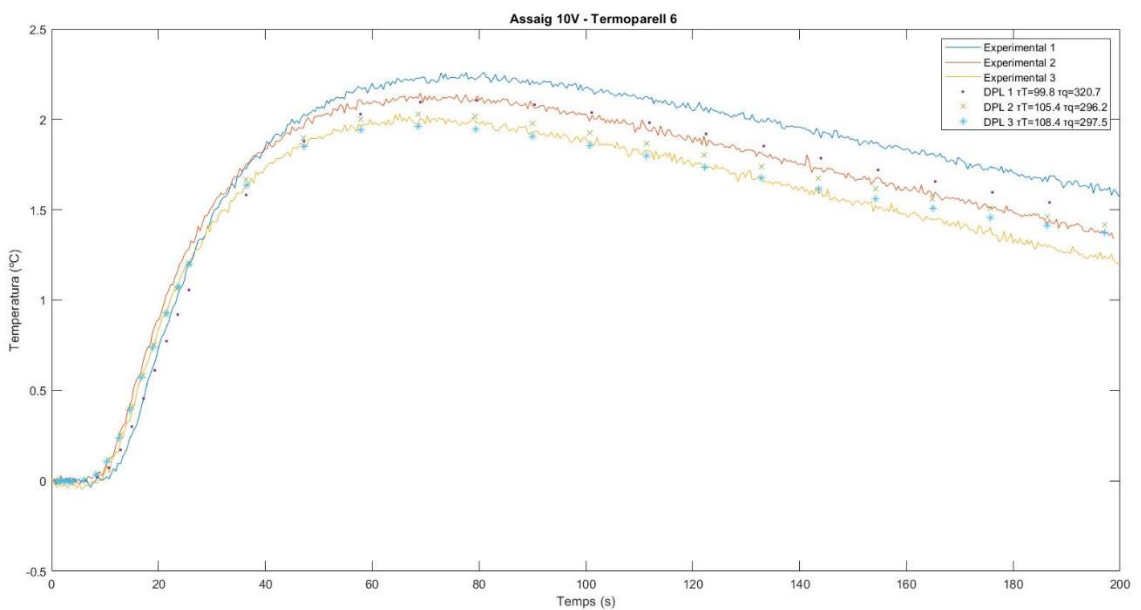
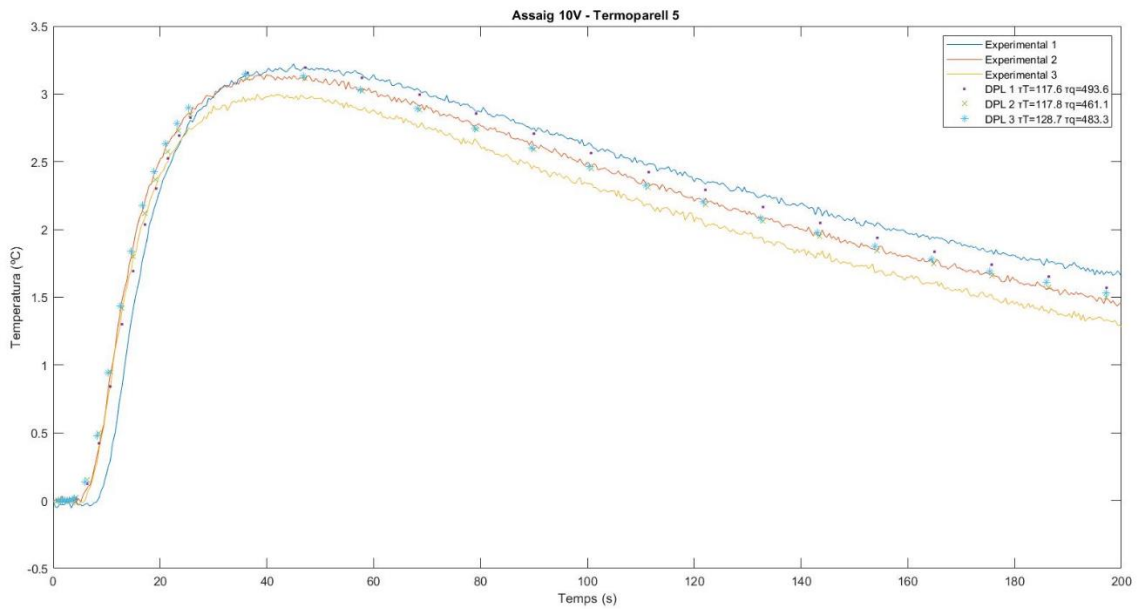
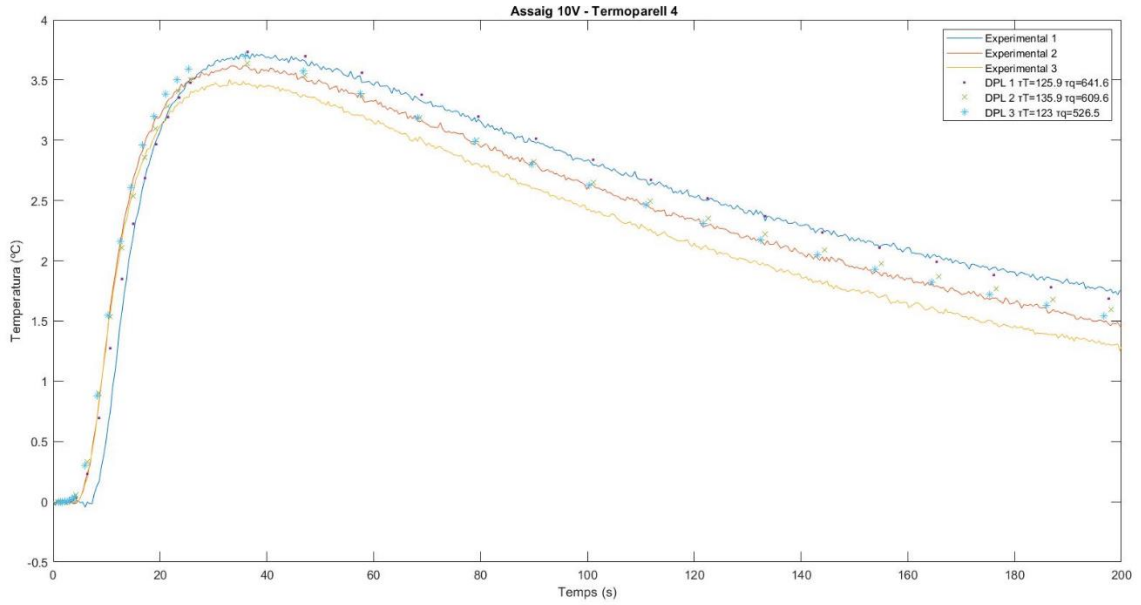
8.1.2.1.- Assajos 10V

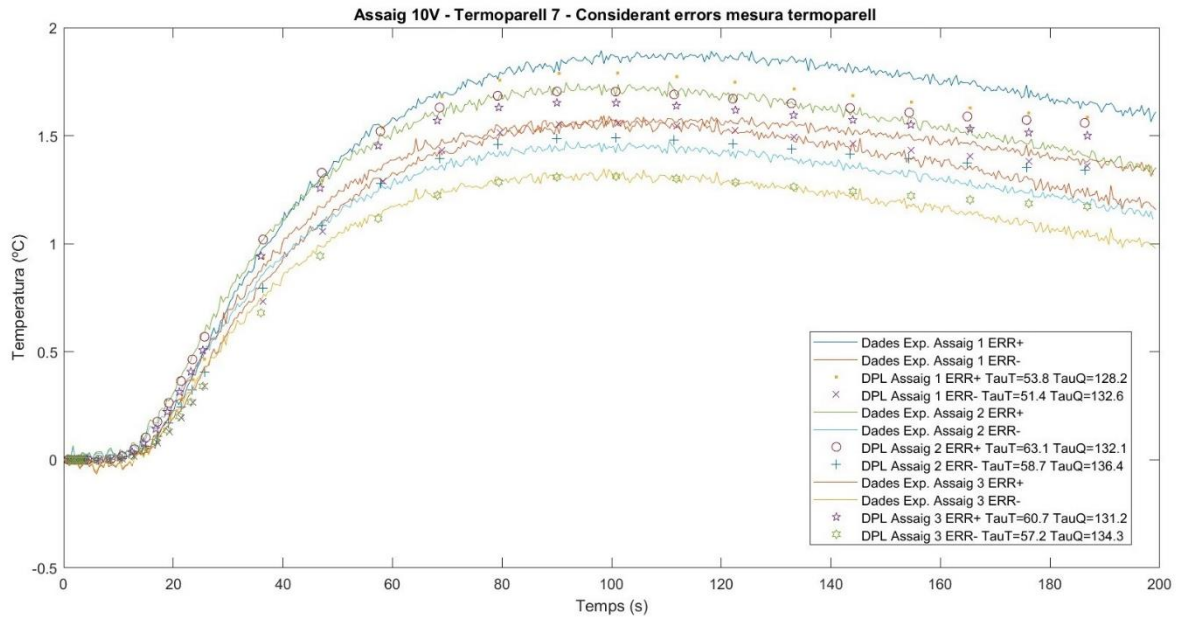
En aquest apartat s'introdueixen els resultats obtinguts. L'anàlisi d'aquests es realitza a l'Apartat 7.2 - Conclusions d'aquest treball.

Pels 3 assajos a 10 Volts les corbes de temperatura obtingudes són les que s'adjunten a continuació. A les gràfiques es poden observar les 3 corbes contínues, que són les temperatures experimentals obtingudes pels termoparells al laboratori, i també hi ha representats els punts obtinguts a les 3 simulacions juntament amb els valors de "taus" de cada simulació.

Pels resultats finals no s'han tingut en compte els termoparells T8, T9 i T10 a causa que les pèrdues tèrmiques eren massa elevades i les dades es veien alterades. Se'n fa una discussió més àmplia i elaborada a l'apartat de conclusions.







Figures 16 a 22.- Gràfics dels resultats teòrics i experimentals dels tres assaigs i simulacions dels 3 assaigs a 10V.

A continuació s'adjunta una taula on hi consten els rangs de valors de τ_T i τ_q , considerant els errors i incerteses de les mesures, que s'han obtingut a les simulacions teòriques del model DPL.

	τ_T Assaig 1	τ_q Assaig 1	τ_T Assaig 2	τ_q Assaig 2	τ_T Assaig 3	τ_q Assaig 3
T1	[154.6; 158.2]	[1041.0; 1055.6]	[168.4; 173.1]	[1027.9; 1052.3]	[162.5; 176.2]	[1031.1; 1042.3]
T2	[143.2; 148.2]	[836.3; 856.5]	[160.4; 168.6]	[798.0; 820.4]	[139.2; 149.4]	[833.2; 847.6]
T3	[128.1; 132.5]	[715.2; 732.4]	[140.2; 147.4]	[689.5; 708.9]	[128.1; 137.5]	[614.0; 624.6]
T4	[123.7; 128.1]	[634.0; 649.2]	[132.5; 139.3]	[601.1; 618.1]	[118.7; 127.3]	[522.0; 531.0]
T5	[115.6; 119.6]	[487.7; 499.5]	[114.9; 120.7]	[454.7; 467.5]	[124.2; 133.2]	[479.2; 487.4]
T6	[98.1; 101.5]	[316.9; 324.5]	[102.8; 108.0]	[292.1; 300.3]	[104.6; 112.2]	[295.0; 300.0]
T7	[51.4; 53.8]	[128.2; 132.6]	[58.7; 63.1]	[132.1; 136.4]	[57.2; 60.7]	[131.2; 134.3]

Taula 11.- Taula on es mostren els rangs de τ_T i τ_q obtinguts a les simulacions amb el model DPL, unitats en segons.

A partir d'aquests valors, s'obté el següent gràfic desfasament(τ)-posició dels assajos a 10V:

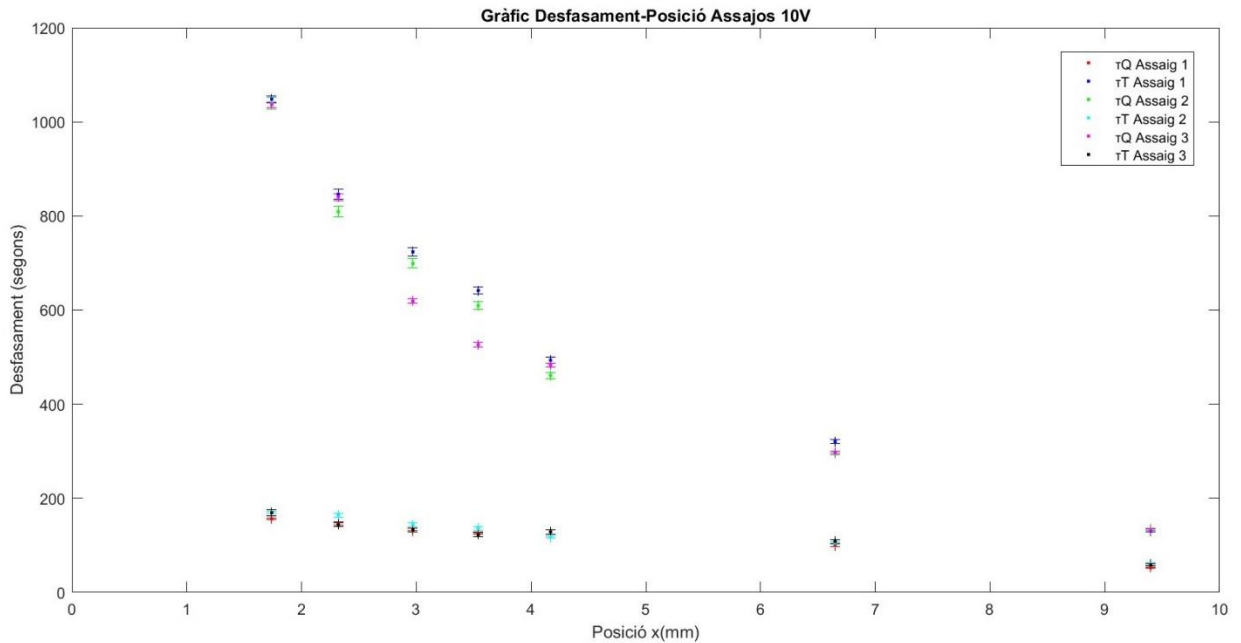


Figura 23.- Gràfic de dispersió dels rangs de taus obtinguts als diversos assajos a 10V.

Pel que fa a la quantificació de les fluctuacions locals de les lectures prèvies al pols de calor, que s'analitzen en més detall a les conclusions i que serveixen d'indicador de la precisió de les mesures, s'obtenen les següents taules de valors. Per calcular la fluctuació s'han tingut en compte les mesures màximes i mínimes de cada termoparell abans del pols de calor, i posteriorment s'ha trobat el percentatge que representa aquesta fluctuació local respecte el pic màxim de l'assaig un cop aplicat el pols de calor.

TERMOPARELL	FLUCTUACIÓ	PIC MÀXIM	FLUCTUACIÓ %
10V ASSAIG 1 T1	0.04 °C	24.29 °C	0.16%
10V ASSAIG 1 T2	0.06 °C	22.56 °C	0.27%
10V ASSAIG 1 T3	0.06 °C	21.49 °C	0.28%
10V ASSAIG 1 T4	0.04 °C	20.98 °C	0.19%
10V ASSAIG 1 T5	0.05 °C	20.49 °C	0.24%
10V ASSAIG 1 T6	0.03 °C	19.41 °C	0.15%
10V ASSAIG 1 T7	0.04 °C	18.90 °C	0.21%

Taula 12.- Taula on s'indiquen les fluctuacions locals prèvies al pols de calor dels termoparells de l'assaig 1 a 10V.

TERMOPARELL	FLUCTUACIÓ	PIC MÀXIM	FLUCTUACIÓ %
10V ASSAIG 2 T1	0.03 °C	24.67 °C	0.12%
10V ASSAIG 2 T2	0.04 °C	23.01 °C	0.17%
10V ASSAIG 2 T3	0.04 °C	21.94 °C	0.18%
10V ASSAIG 2 T4	0.04 °C	21.47 °C	0.19%
10V ASSAIG 2 T5	0.04 °C	20.92 °C	0.19%
10V ASSAIG 2 T6	0.04 °C	19.83 °C	0.20%
10V ASSAIG 2 T7	0.06 °C	19.29 °C	0.31%

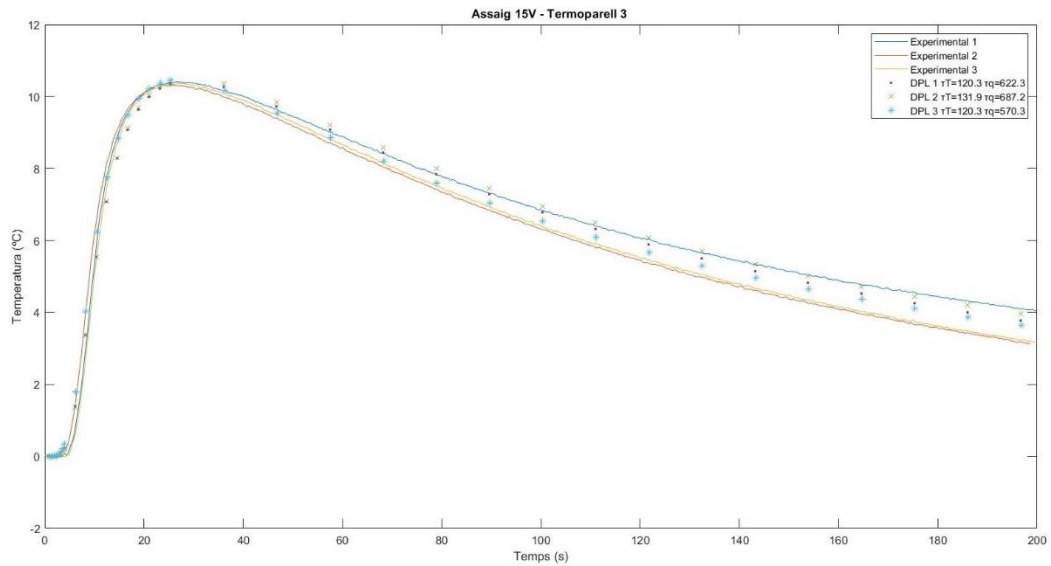
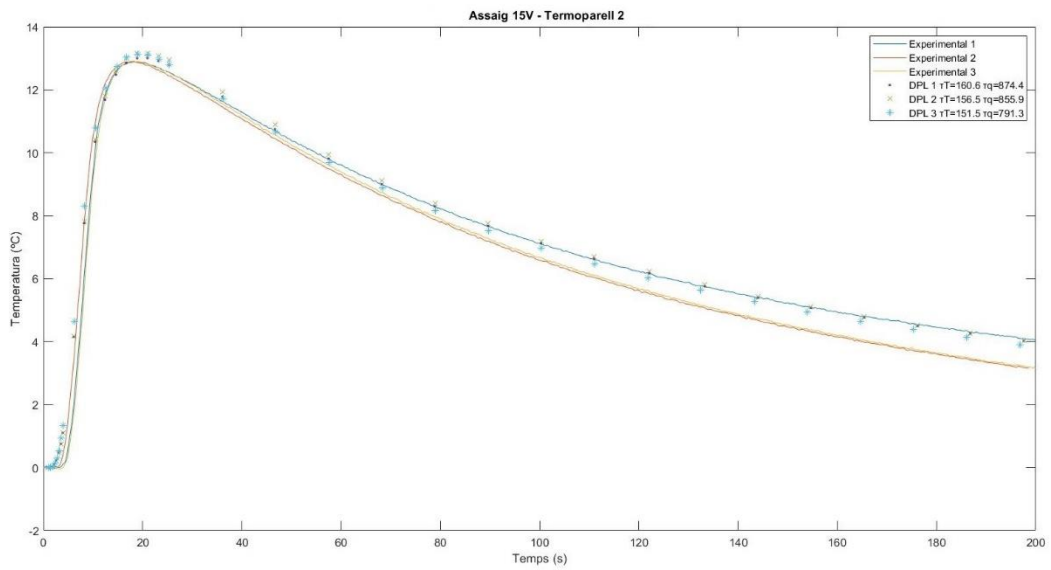
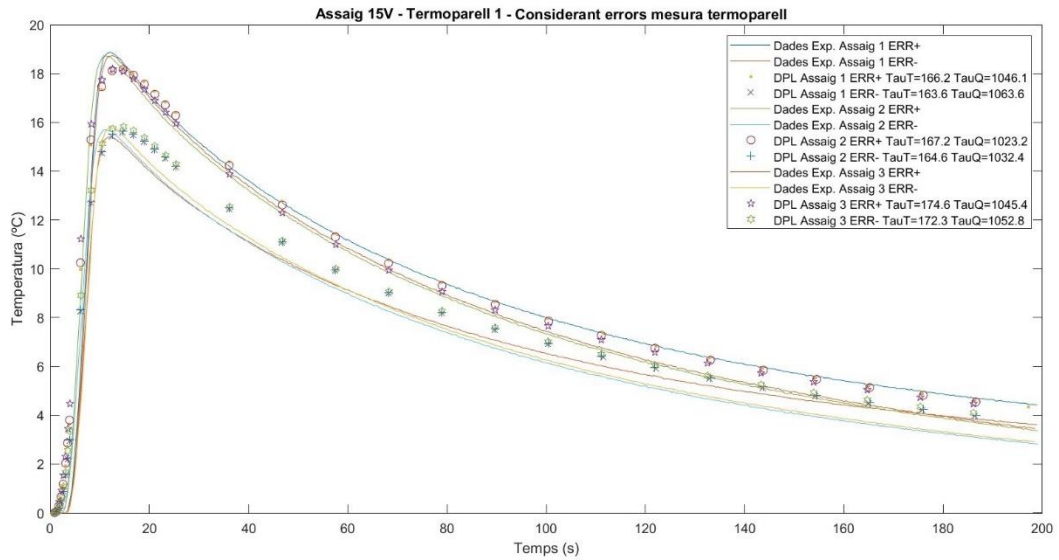
Taula 13.- Taula on s'indiquen les fluctuacions locals prèvies al pols de calor dels termoparells de l'assaig 2 a 10V.

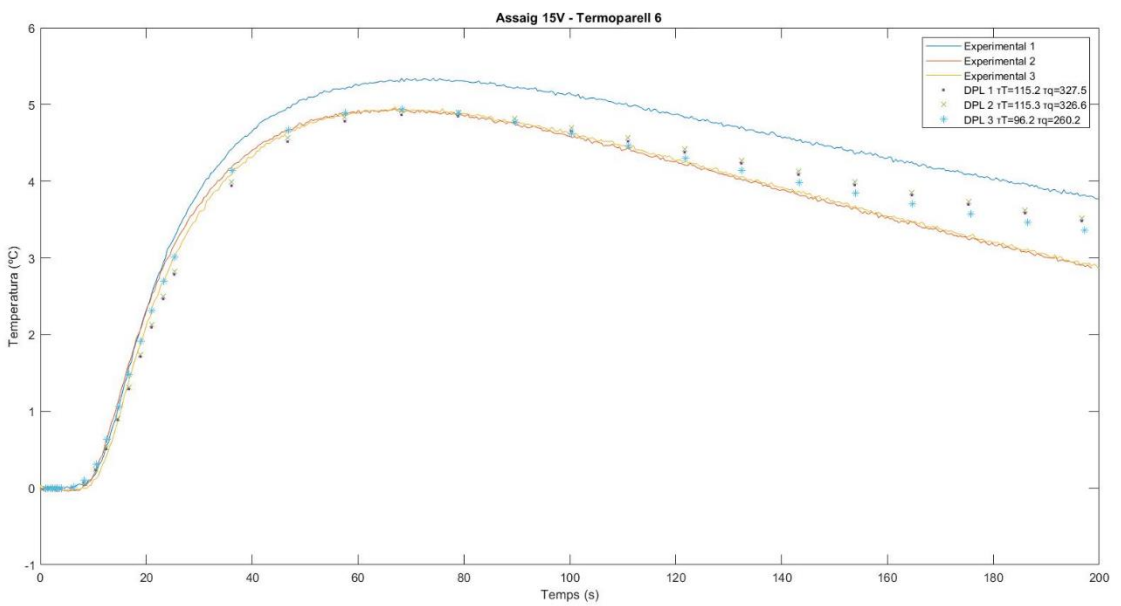
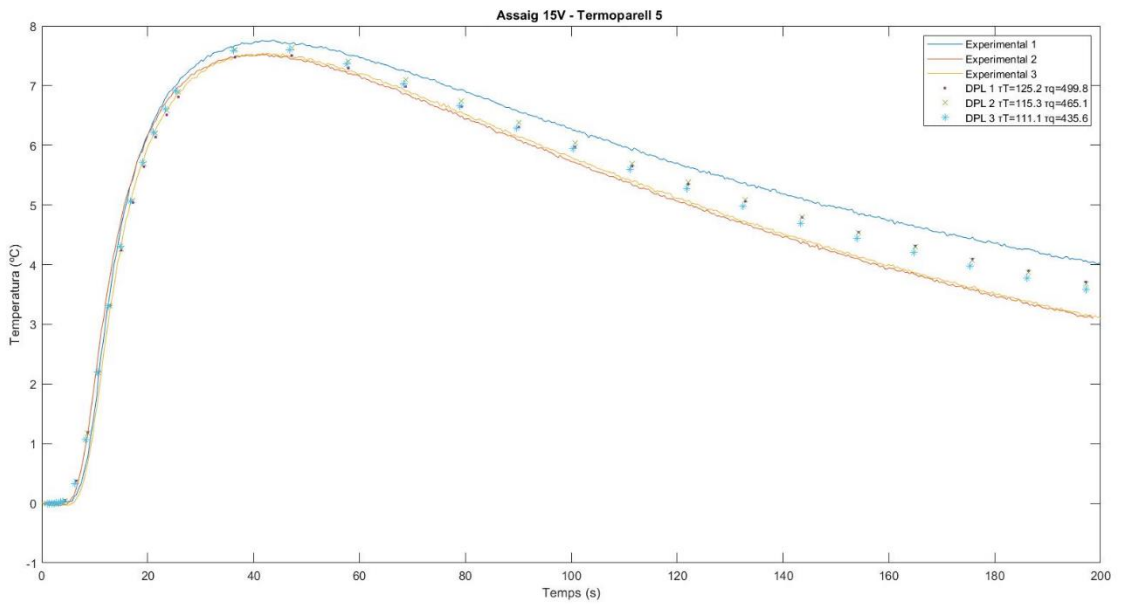
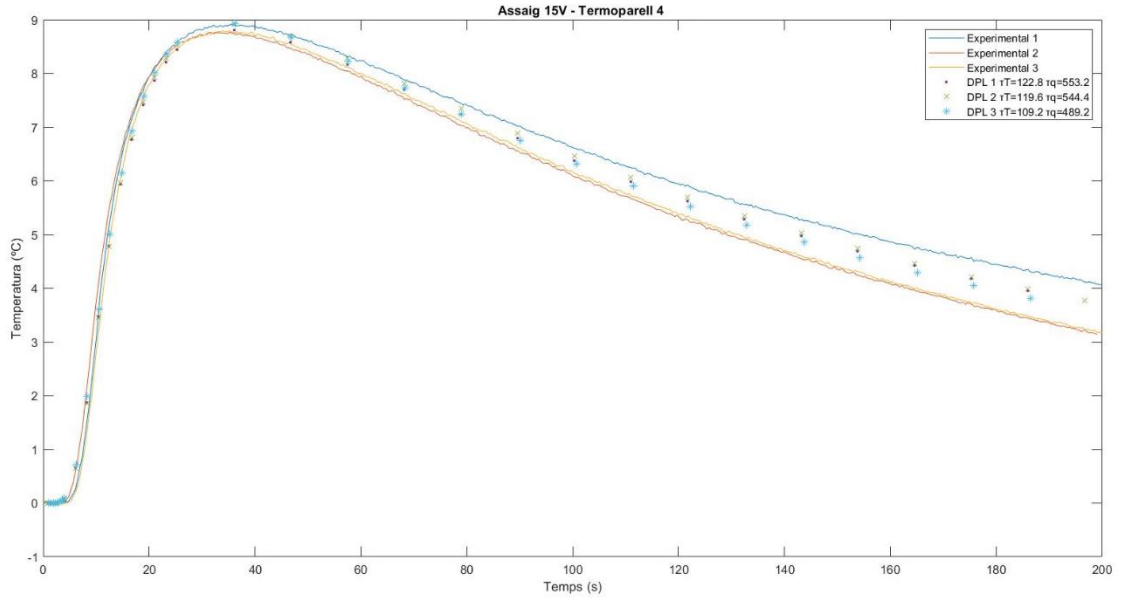
TERMOPARELL	FLUCTUACIÓ	PIC MÀXIM	FLUCTUACIÓ %
10V ASSAIG 3 T1	0.05 °C	24.62 °C	0.20%
10V ASSAIG 3 T2	0.05 °C	22.98 °C	0.22%
10V ASSAIG 3 T3	0.04 °C	21.96 °C	0.18%
10V ASSAIG 3 T4	0.04 °C	21.54 °C	0.19%
10V ASSAIG 3 T5	0.03 °C	20.97 °C	0.15%
10V ASSAIG 3 T6	0.04 °C	19.87 °C	0.20%
10V ASSAIG 3 T7	0.04 °C	19.32 °C	0.21%

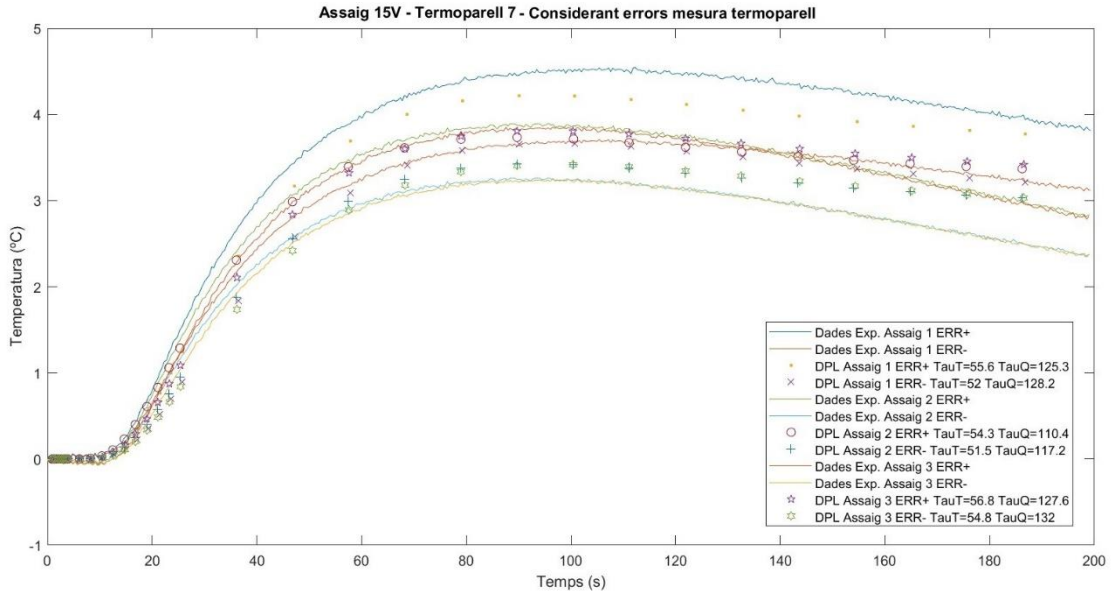
Taula 14.- Taula on s'indiquen les fluctuacions locals prèvies al pols de calor dels termoparells de l'assaig 3 a 10V.

8.1.2.2.- Assajos 15V

Pels 3 assajos a 15 Volts, les corbes temperatura-temps teòriques i experimentals són les següents:







Figures 24 a 30.- Gràfics dels resultats teòrics i experimentals dels tres assaigs i simulacions dels 3 assaigs a 15V.

A continuació també s'adjunta una taula on hi consten els rangs de valors de τ_T i τ_q , considerant els errors i imprecisions de mesures, obtinguts a les corresponents simulacions teòriques dels assaigs a 15V:

	τ_T Assaig 1	τ_q Assaig 1	τ_T Assaig 2	τ_q Assaig 2	τ_T Assaig 3	τ_q Assaig 3
T1	[163.6; 166.2]	[1046.1; 1063.6]	[164.6; 167.2]	[1023.2; 1032.4]	[172.3; 174.6]	[1045.4; 1052.8]
T2	[157.3; 163.9]	[865.8; 883.0]	[154.7; 160.1]	[838.6; 868.0]	[149.6; 153.4]	[783.2; 799..4]
T3	[117.8; 122.8]	[616.2; 628.4]	[129.6; 134.2]	[675.4; 699.0]	[118.8; 121.8]	[564.5; 576.1]
T4	[120.3; 125.3]	[547.7; 558.7]	[117.5; 121.7]	[535.0; 553.8]	[107.9; 110.5]	[484.2; 494.2]
T5	[122.6; 127.8]	[494.9; 504.7]	[113.3; 117.3]	[457.1; 473.1]	[109.7; 112.5]	[431.1; 440.1]
T6	[112.8; 117.6]	[324.3; 330.7]	[113.3; 117.3]	[321.0; 332.2]	[95.0; 97.4]	[257.5; 262.9]
T7	[52.0; 55.6]	[125.3; 128.2]	[51.5; 54.3]	[110.4; 117.2]	[54.8; 56.8]	[127.6; 132.0]

Taula 15.- Taula on es mostren els rangs de τ_T i τ_q obtinguts a les simulacions amb el model DPL, unitats en segons.

A partir d'aquests rangs de desfasament s'obté el gràfic desfasament(τ)-posició següent:

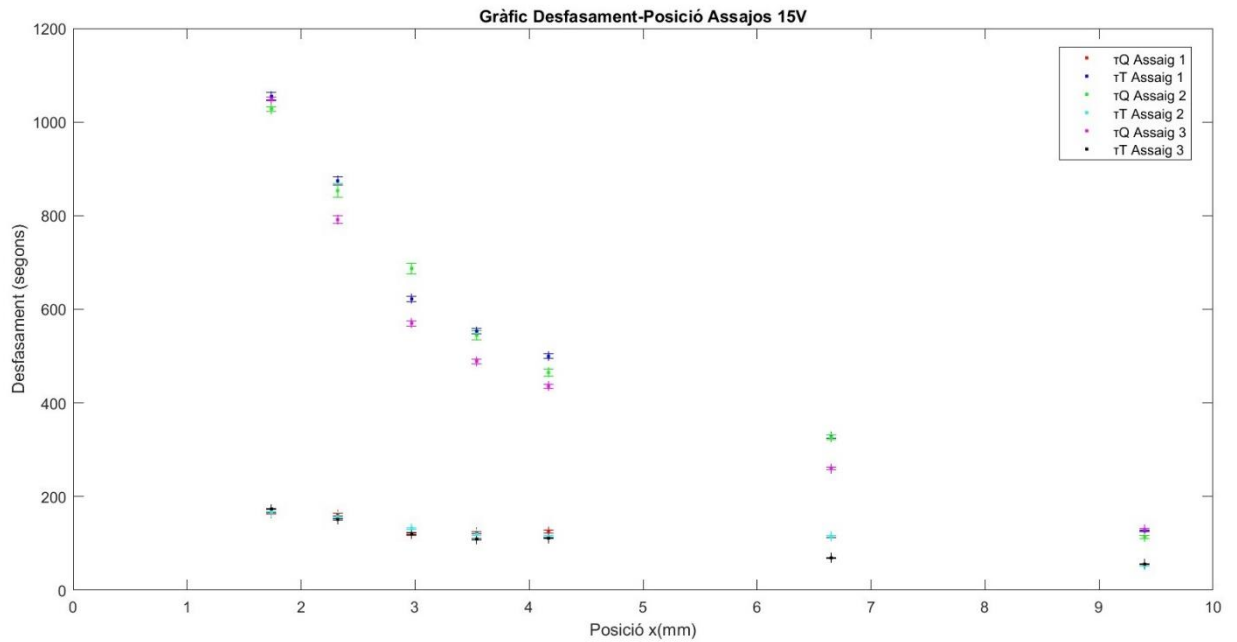


Figura 31.- Gràfic de dispersió dels rangs de taus obtinguts als diversos assajos a 15V.

Les fluctuacions locals prèvies a l'aplicació del pols de calor es mostren a les següents taules de valors:

TERMOPARELL	FLUCTUACIÓ	PIC MÀXIM	FLUCTUACIÓ %
15V ASSAIG 1 T1	0.08 °C	31.99 °C	0.25%
15V ASSAIG 1 T2	0.06 °C	27.78 °C	0.22%
15V ASSAIG 1 T3	0.06 °C	25.29 °C	0.24%
15V ASSAIG 1 T4	0.05 °C	23.82 °C	0.21%
15V ASSAIG 1 T5	0.06 °C	22.59 °C	0.27%
15V ASSAIG 1 T6	0.07 °C	20.19 °C	0.35%
15V ASSAIG 1 T7	0.08 °C	18.99 °C	0.42%

Taula 16.- Taula on s'indiquen les fluctuacions locals prèvies al pols de calor dels termoparells de l'assaig 1 a 15V.

TERMOPARELL	FLUCTUACIÓ	PIC MÀXIM	FLUCTUACIÓ %
15V ASSAIG 2 T1	0.05 °C	34.24 °C	0.15%
15V ASSAIG 2 T2	0.07 °C	30.02 °C	0.23%
15V ASSAIG 2 T3	0.07 °C	27.44 °C	0.26%
15V ASSAIG 2 T4	0.08 °C	25.96 °C	0.31%
15V ASSAIG 2 T5	0.06 °C	24.65 °C	0.24%
15V ASSAIG 2 T6	0.08 °C	22.05 °C	0.36%
15V ASSAIG 2 T7	0.06 °C	20.64 °C	0.29%

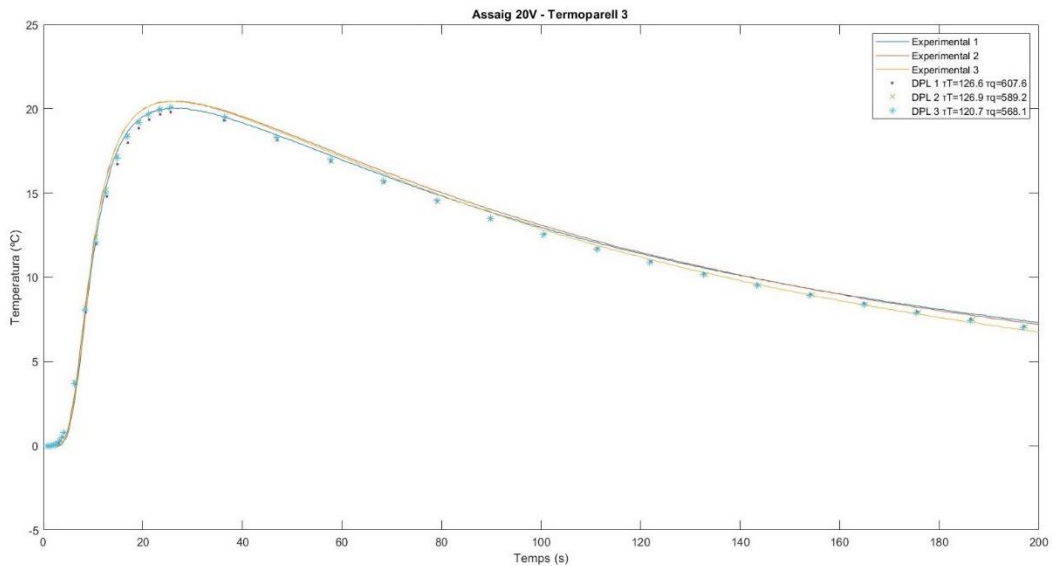
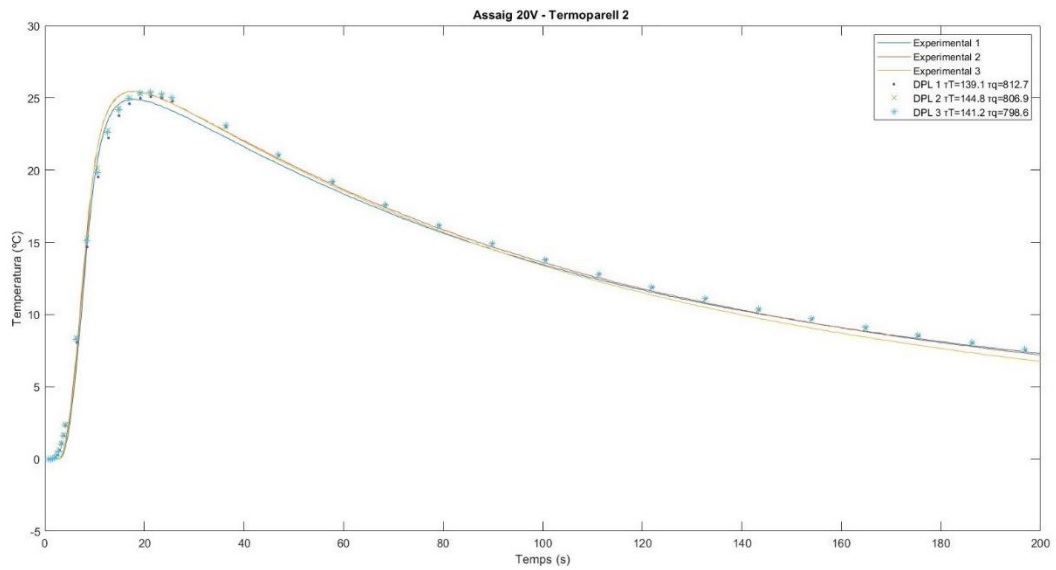
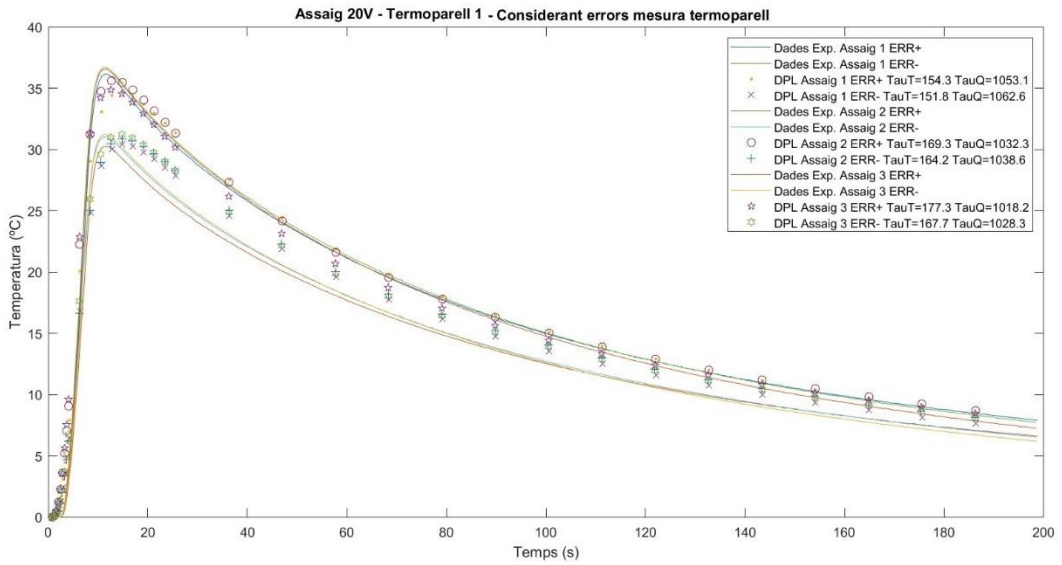
Taula 17.- Taula on s'indiquen les fluctuacions locals prèvies al pols de calor dels termoparells de l'assaig 2 a 15V.

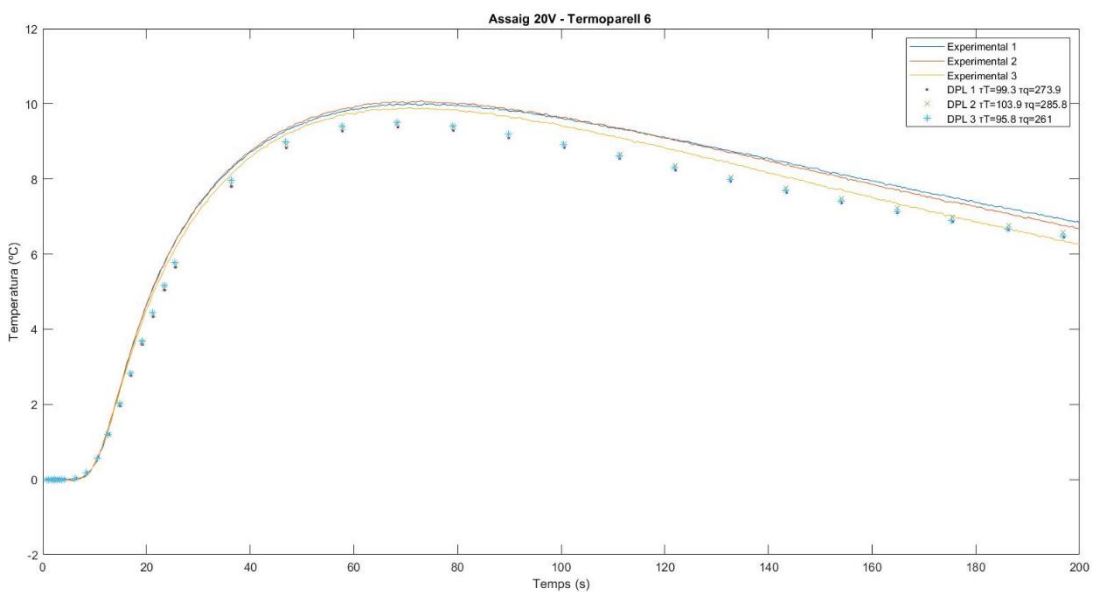
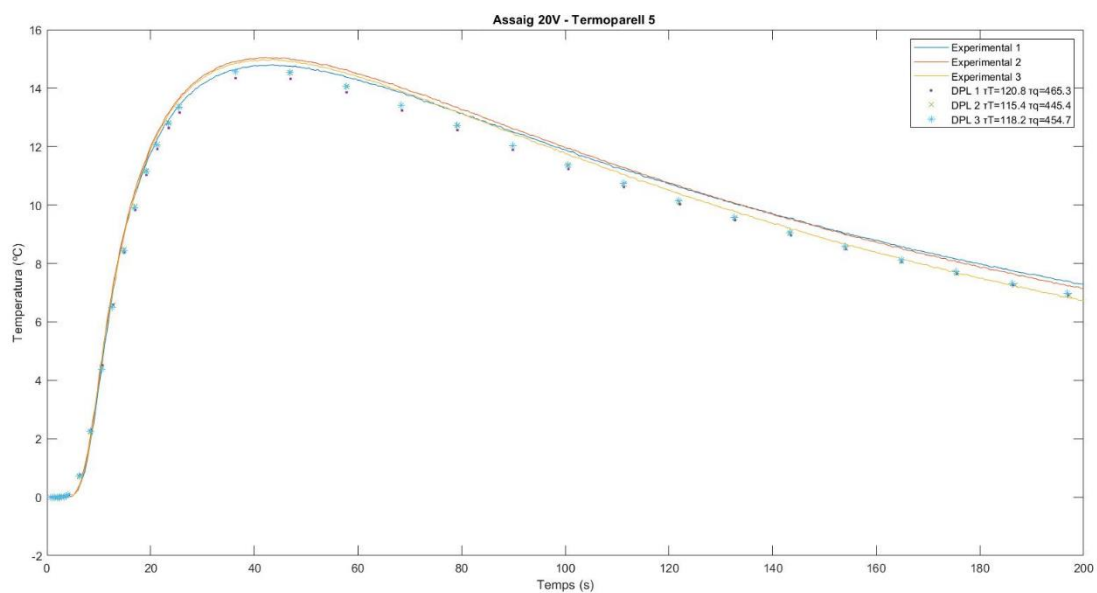
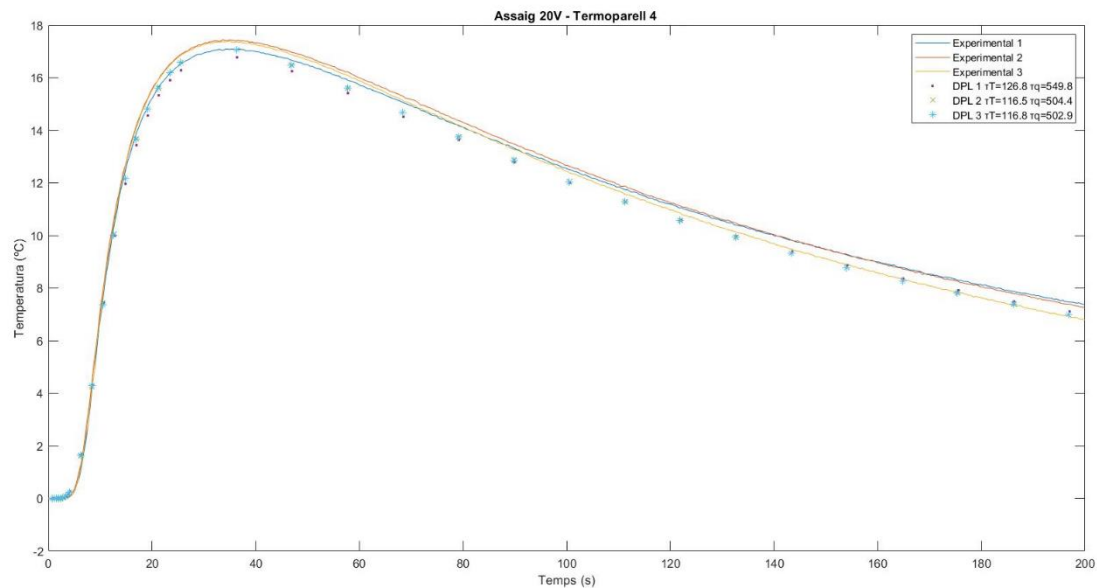
TERMOPARELL	FLUCTUACIÓ	PIC MÀXIM	FLUCTUACIÓ %
15V ASSAIG 3 T1	0.05 °C	34.75 °C	0.14%
15V ASSAIG 3 T2	0.09 °C	30.52 °C	0.29%
15V ASSAIG 3 T3	0.06 °C	27.96 °C	0.21%
15V ASSAIG 3 T4	0.06 °C	26.50 °C	0.23%
15V ASSAIG 3 T5	0.06 °C	25.17 °C	0.24%
15V ASSAIG 3 T6	0.05 °C	22.59 °C	0.22%
15V ASSAIG 3 T7	0.06 °C	21.16 °C	0.28%

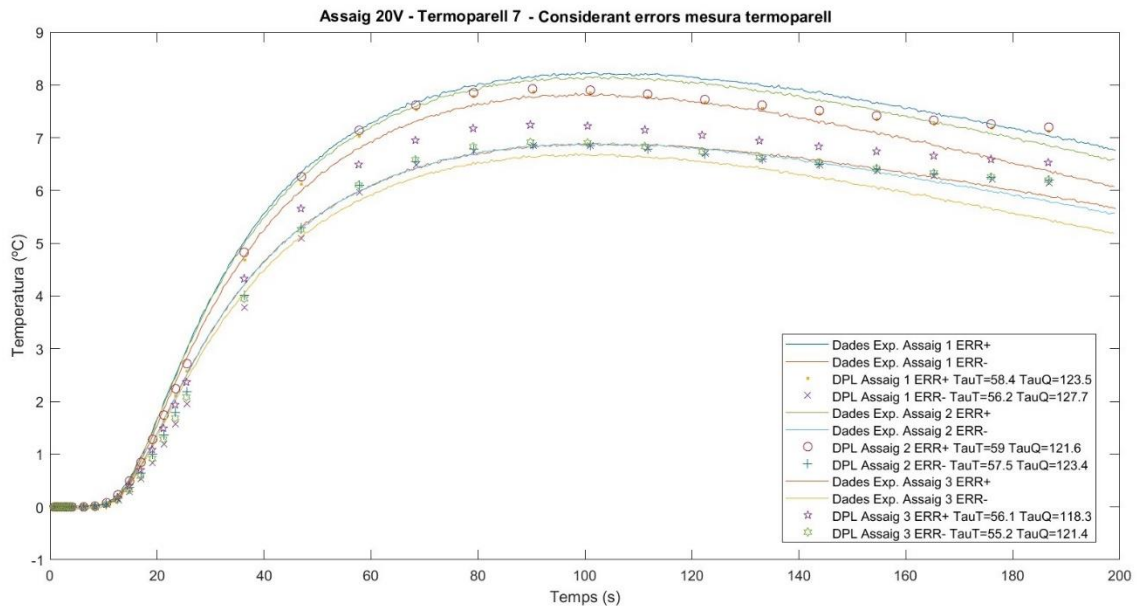
Taula 18.- Taula on s'indiquen les fluctuacions locals prèvies al pols de calor dels termoparells de l'assaig 3 a 15V.

8.1.2.3.- Assajos 20V

Pels 3 assajos a 20V, les corbes temperatura-temps teòriques i experimentals són les següents:







Figures 32 a 38 .- Gràfics dels resultats teòrics i experimentals dels tres assajos i simulacions dels 3 assajos a 20V.

A continuació s'adjunta la taula amb els rangs de valors de desfasament obtinguts a les simulacions teòriques DPL dels assajos a 20V:

	τ_T Assaig 1	τ_q Assaig 1	τ_T Assaig 2	τ_q Assaig 2	τ_T Assaig 3	τ_q Assaig 3
T1	[151.8; 154.3]	[1053.1; 1062.6]	[164.2; 169.3]	[1032.3; 1038.6]	[167.7; 177.3]	[1018.2; 1028.3]
T2	[137.2; 141.0]	[804.1; 821.3]	[142.8; 146.8]	[802.7; 811.1]	[138.7; 143.7]	[791.5; 805.7]
T3	[124.9; 128.3]	[601.2; 614.0]	[125.1; 128.7]	[586.1; 592.3]	[118.5; 122.9]	[563.0; 573.2]
T4	[125.1; 128.5]	[544.0; 555.6]	[114.9; 118.1]	[501.8; 507.0]	[114.7; 118.9]	[498.4; 507.4]
T5	[119.1; 122.5]	[460.4; 470.2]	[113.8; 117.0]	[443.1; 447.7]	[116.1; 120.3]	[450.6; 458.8]
T6	[97.9; 100.7]	[271.0; 276.8]	[102.4; 105.4]	[284.3; 287.3]	[94.1; 97.5]	[258.7; 263.3]
T7	[56.2; 58.4]	[123.5; 127.7]	[57.5; 59.0]	[121.6; 123.4]	[55.2; 56.1]	[118.3; 121.4]

Taula 19.- Taula on es mostren els rangs de τ_T i τ_q obtinguts a les simulacions amb el model DPL, unitats en segons..

A partir d'aquests rangs de desfasament, s'obté el gràfic desfasament(τ)-posició següent:

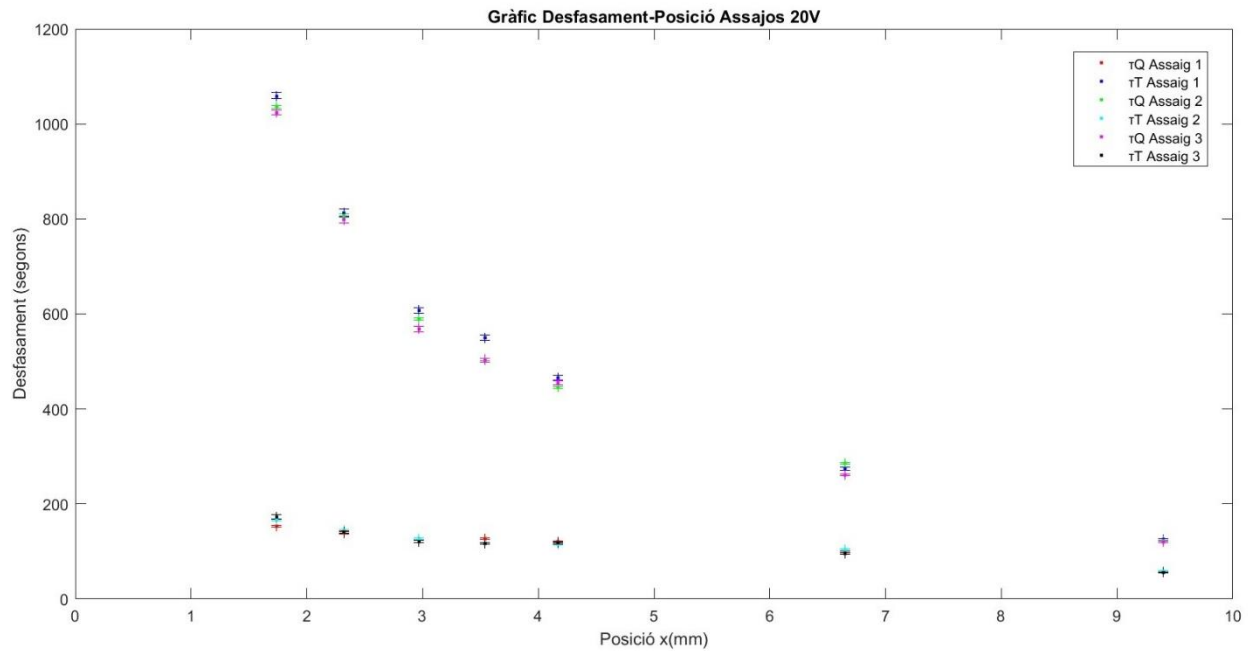


Figura 39.- Gràfic de dispersió dels rangs de taus obtinguts als diversos assajos a 20V.

Les fluctuacions locals prèvies a l'aplicació del pols de calor es mostren a les següents taules de valors:

TERMOPARELL	FLUCTUACIÓ	PIC MÀXIM	FLUCTUACIÓ %
20V ASSAIG 1 T1	0.04 °C	50.09 °C	0.08%
20V ASSAIG 1 T2	0.05 °C	41.87 °C	0.12%
20V ASSAIG 1 T3	0.04 °C	36.96 °C	0.11%
20V ASSAIG 1 T4	0.03 °C	34.12 °C	0.09%
20V ASSAIG 1 T5	0.05 °C	31.74 °C	0.18%
20V ASSAIG 1 T6	0.05 °C	26.88 °C	0.19%
20V ASSAIG 1 T7	0.05 °C	24.45 °C	0.20%

Taula 20.- Taula on s'indiquen les fluctuacions locals prèvies al pols de calor dels termoparells de l'assaig 1 a 20V.

TERMOPARELL	FLUCTUACIÓ	PIC MÀXIM	FLUCTUACIÓ %
20V ASSAIG 2 T1	0.02 °C	51.76 °C	0.04%
20V ASSAIG 2 T2	0.05 °C	43.42 °C	0.12%
20V ASSAIG 2 T3	0.04 °C	38.36 °C	0.10%
20V ASSAIG 2 T4	0.04 °C	35.52 °C	0.11%
20V ASSAIG 2 T5	0.05 °C	33.09 °C	0.15%
20V ASSAIG 2 T6	0.04 °C	28.03 °C	0.14%
20V ASSAIG 2 T7	0.05 °C	25.47 °C	0.19%

Taula 21.- Taula on s'indiquen les fluctuacions locals prèvies al pols de calor dels termoparells de l'assaig 2 a 20V.

TERMOPARELL	FLUCTUACIÓ	PIC MÀXIM	FLUCTUACIÓ %
20V ASSAIG 3 T1	0.06 °C	52.91 °C	0.11%
20V ASSAIG 3 T2	0.05 °C	44.59 °C	0.11%
20V ASSAIG 3 T3	0.04 °C	39.54 °C	0.10%
20V ASSAIG 3 T4	0.04 °C	36.70 °C	0.11%
20V ASSAIG 3 T5	0.04 °C	34.23 °C	0.12%
20V ASSAIG 3 T6	0.06 °C	29.05 °C	0.21%
20V ASSAIG 3 T7	0.08 °C	26.42 °C	0.30%

Taula 22.- Taula on s'indiquen les fluctuacions locals prèvies al pols de calor dels termoparells de l'assaig 3 a 20V.

8.1.2.4.- Globals

A continuació s'adjunta el gràfic desfasament(τ)-posició amb tots els rangs de desfasament obtinguts als diferents assajos realitzats.

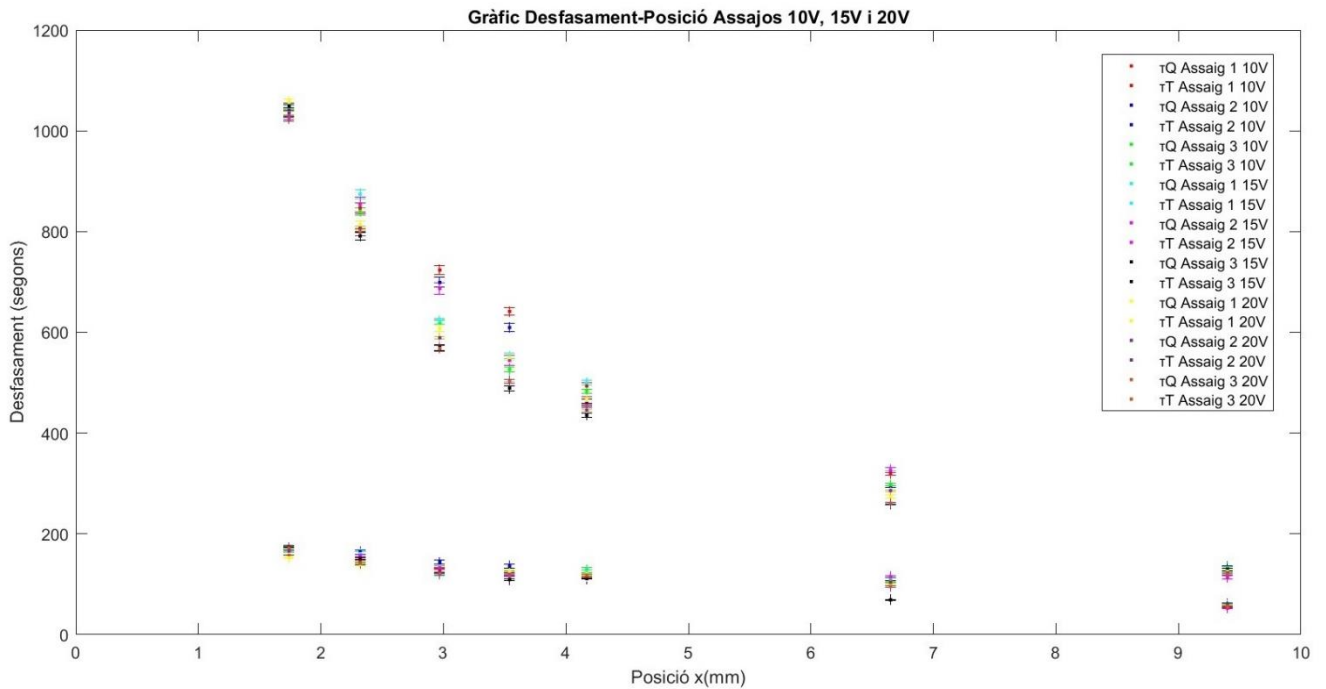


Figura 40 – Gràfic on es superposen les τ_T i τ_Q de tots els assajos realitzats a diferents voltatges.

I s'adjunten les taules amb els percentatges d'incertesa a l'hora de calcular les taus. Aquest percentatge s'ha calculat de la següent manera: Per T1 i T7 fer simulacions amb corbes amb error de temperatura positiu i negatiu, trobar el rang de variació de taus segons si l'error és positiu o negatiu, calcular el percentatge que representa aquesta variació respecte el valor mitjà de cada desfasament. Per T1 i T7 s'han utilitzat directament aquests valors d'error, i per la resta de termoparells, la mitjana.

T1	τ_T Assaig 1	τ_q Assaig 1	τ_T Assaig 2	τ_q Assaig 2	τ_T Assaig 3	τ_q Assaig 3
10 V	+/-1.15%	+/-0.70%	+/-1.38%	+/-1.17%	+/-4.04%	+/-0.54%
15 V	+/-0.79%	+/-0.83%	+/-0.78%	+/-0.45%	+/-0.66%	+/-0.35%
20 V	+/-0.82%	+/-0.45%	+/-1.53%	+/-0.30%	+/-2.78%	+/-0.49%

Taula 23.- Taula amb els valors percentuals de la variació dels valors de desfasament respecte el valor mig obtingut a les simulacions. En aquest cas, pel termoparell T1.

T7	τ_T Assaig 1	τ_q Assaig 1	τ_T Assaig 2	τ_q Assaig 2	τ_T Assaig 3	τ_q Assaig 3
10 V	+/-2.28%	+/-1.69%	+/-3.61%	+/-1.60%	+/-2.97%	+/-1.17%
15 V	+/-3.35%	+/-1.14%	+/-2.65%	+/-2.99%	+/-1.79%	+/-1.69%
20 V	+/-1.92%	+/-1.67%	+/-1.29%	+/-0.73%	+/-0.81%	+/-1.29%

Taula 24.- Taula amb els valors percentuals de la variació dels valors de desfasament respecte el valor mig obtingut a les simulacions. En aquest cas, pel termoparell T7.

Altres T	τ_T Assaig 1	τ_q Assaig 1	τ_T Assaig 2	τ_q Assaig 2	τ_T Assaig 3	τ_q Assaig 3
10 V	+/-1.72%	+/-1.19%	+/-2.49%	+/-1.39%	+/-3.51%	+/-0.85%
15 V	+/-2.07%	+/-0.99%	+/-1.72%	+/-1.72%	+/-1.23%	+/-1.02%
20 V	+/-1.37%	+/-1.06%	+/-1.41%	+/-0.52%	+/-1.80%	+/-0.89%

Taula 25.- Taula amb els valors percentuals de la variació dels valors de desfasament respecte els valors obtinguts a les simulacions. En aquest cas, per la resta de termoparells (T2, T3, T4, T5 i T6).

8.2.- Conclusions

8.2.1.- Conclusions experimentals

A partir dels resultats, i a través de les corbes temperatura-temps teòriques i experimentals, es pot confirmar que el model Dual-Phase-Lag s'adapta correctament a les dades experimentals. Utilitzant aquest model s'han pogut obtenir els valors dels desfasaments dels nanotubs de carboni, que era l'objectiu principal del treball, i que s'han presentat al llarg de l'Apartat 7.1.2 del treball.

Cal destacar també que s'han obtingut bons resultats a les corbes de desfasament-posició ja que la forma de les corbes s'adapta a la literatura que hi ha al respecte, els valors de desfasament obtinguts també, i els rangs de variació dels desfasaments teòrics són relativament baixos.

A partir dels resultats també es pot arribar a la conclusió que els valors de desfasament no depenen de la potència del pols de calor aplicat, ja que els valors obtinguts als diversos assajos a diferents potències són molt semblants els uns als altres, tal i com es pot observar a la Figura 40, on s'exposen les tres corbes desfasament-posició dels assajos de 10, 15 i 20V. Per tant, el valor dels desfasaments és independent de la potència dels assajos. Aquesta

conclusió és lògica, ja que teòricament els valors de desfasament són una propietat intrínseca del material, per tant, no haurien de variar amb la potència del pols de calor.

També és adequat destacar que les corbes de temperatura obtingudes als assajos experimentals del laboratori s'han considerat adequades ja que la repetibilitat és bona, els tres assajos a cada voltatge són molt semblants, tal i com es pot observar clarament a les gràfiques mostrades a l'apartat de resultats. Un altre paràmetre indicatiu de la precisió de les mesures són les fluctuacions locals, les quals s'han quantificat i exposat als resultats. Els valors de fluctuació són baixos i és un bon indicatiu de la bona precisió de la mesura dels termoparells. Tot i així, si de cares al futur es volguessin millorar els assajos, es podrien utilitzar termoparells "Special Grade" del tipus T, R o S, que garanteixen millor precisió. També es podria fer un apantallat o "loop back" d'una de les potes dels termoparells per tal de reduir els possibles sorolls que interfereixen mínimament la lectura, això podria millorar encara més la precisió de les lectures dels termoparells.

Pel que fa als termoparells T8, T9 i T10, s'han desestimat ja que les dades que registraven no coincidien amb el model teòric. Després d'un anàlisi més en profunditat, es va descobrir que era degut a les pèrdues tèrmiques, sobretot a causa que són els termoparells més allunyats del focus de calor, i és on es registren els temps més grans. Cal recordar que el nostre model considera que el material està perfectament aïllat. Com a conseqüència, es va decidir aïllar el muntatge utilitzant l'escuma de polietilè aïllant que s'ha mencionat diverses vegades durant el treball. Tal i com es pot veure a la Figura 41, els resultats van millorar, però tot i així les dades es veien alterades respecte el model teòric, per aquest motiu finalment es va decidir no utilitzar-les. A temps curts i distàncies curtes, aquestes pèrdues tenen efectes mínims, però a la que s'augmenten aquests dos factors, majors són les pèrdues. La solució ideal seria poder aïllar totalment el muntatge utilitzant una campana de buit. Això faria que s'eliminassin les pèrdues per convecció, que en aquest cas són les més dominants. Llavors, els resultats d'aquests termoparells molt probablement s'adaptarien millor al model teòric i podrien ser utilitzats per determinar correctament el punt de creuament entre la Tau Q i Tau T, i el punt on a partir del qual el comportament del sistema passa a ser determinat per la llei de Fourier (punt on els desfasaments són nuls). Pels resultats obtinguts es pot arribar a intuir que aquest punt on ambdós desfasaments són nuls es trobaria al voltant dels termoparells T9 i T10, ja que les taus obtingudes són pròximes a 0. Tot i així, com que les dades no són prou adequades i es veuen alterades per aquestes pèrdues, no es pot determinar amb prou certesa i rigor la posició d'aquesta posició on es comença a aplicar Fourier. Per tant, es podria millorar el muntatge

experimental i les dades obtingudes si el muntatge es trobés dins una campana de buit per tal de reduir les pèrdues energètiques per convecció.

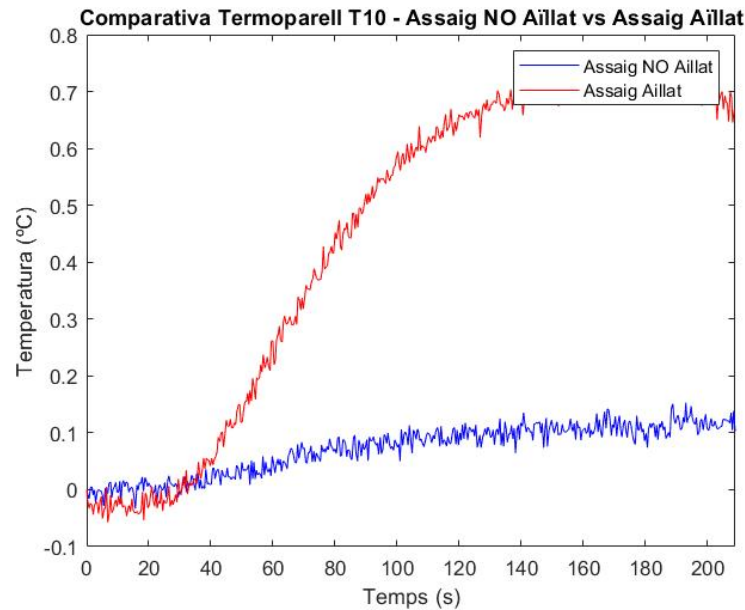


Figura 41.- Gràfic de dues lectures del termoparell T10 amb dos polsos de calor iguals. En blau en el muntatge no aïllat, i en vermell al muntatge aïllat. S'observa una clara disminució de les pèrdues tèrmiques un cop aplicat l'aïllament.

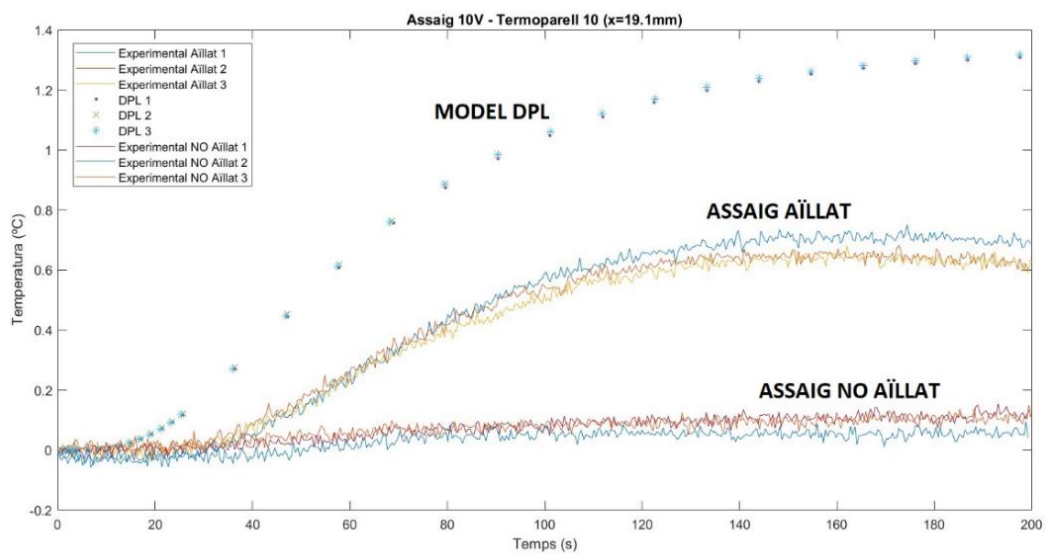


Figura 42 .- Gràfic on es mostren els resultats experimentals a la posició del T10 amb el muntatge aïllat i no aïllat (línies contínues), i els resultats del model DPL (punts discrets). Es veu com l'assaig aïllat s'aproxima més als resultats del model, però tot i així encara hi ha gran diferència.

Per finalitzar amb les conclusions experimentals cal observar que els valors de desfasament obtinguts pels CNT, de mateixa manera que ho descriu la literatura existent, són elevats. Això reafirma, tal i com ja s'insinua en alguns articles, que els nanotubs de carboni poden ser un bon candidat com a generador termoelèctric operant en règims transitoris (sotmesos a polsos

de calor) aprofitant aquests alts valors de desfasament. L'objectiu és treballar en una zona òptima on s'obtinguin gradients de temperatura superiors als esperats per Fourier per a un flux de calor donat. Per tant, de cares al futur, la utilització d'aquest material, o d'altres de porosos, sembla adequada, i confirma la viabilitat de la línia d'investigació.

Per acabar, els resultats obtinguts en aquest treball s'han presentat en forma de comunicació pòster en el congrés "European Conference on Thermoelectrics" d'aquest any 2023, en la seva edició número 19.

Marc Teixidor Vilarrasa

Banyoles, 8 de Maig de 2023.

9.- SIMBOLOGIA

Símbol	Descripció	Unitats
α	Difusivitat tèrmica del material / "Alpha"	m ² /s
∇	Operador gradient	-
∇T	Gradient de temperatura	K/m
γ	Paràmetre "Bromwich Contour" al fer la inversió Laplace de nombres complexos	s ⁻¹
ρ	Densitat del material	Kg/m ³
τ	Temps de relaxació / Tau / Desfasament	Segons (s)
τ_q	Desfasament del flux de calor / "Tau Q"	Segons (s)
τ_T	Desfasament del gradient de temperatura / "Tau T"	Segons (s)
C	Velocitat de la llum	m/s
ck	Conductivitat tèrmica del material	W/(m*K)
Cp	Calor específic volumètric	J/(K*m ³)
cp	Calor específic màssic	J/(Kg*K)
i	Símbol de la part imaginària d'un nombre imaginari	-
k	Conductivitat tèrmica del material	W/(m*K)
l	Longitud del material d'assaig en la direcció del flux de calor	Metres (m)
p	Operador de Laplace	-
Q	Calor generada pel propi material	W/m ²
\vec{q}	Vector del flux de calor	W/m ²
q_s	Potència per unitat de superfície del flux de calor	W/m ²
\vec{r}	Vector posició del volum de material	Metres (m)
Re	Part real d'una funció	-
T	Temperatura	K o °C
t	Temps	Segons (s)
t _s	Duració del pols de calor	Segons (s)
T _{DPL}	Temperatura teòrica segons el model "Dual-Phase-Lag"	K o °C
T _{EXP}	Temperatura experimental	K o °C
x	Posició en la direcció del flux de calor	Metres (m)

Taula 26.- Simbologia emprada al llarg de la memòria

10.- BIBLIOGRAFIA

- [1] Tzou, Da Yu. Macro-to Microscale Heat Transfer : the Lagging Behavior. Second edition. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons, Inc., 2015.

- [2] Kang Liu, Shuang Cui, Weimin Kan, Xuetao Qi, Cheng Chen & Xuejiao Hu (2013) Giant Thermal Transport Phase Lagging in CNT Aggregates, Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering, 17:3, 236-244, DOI: 10.1080/15567265.2013.787569.

- [3] Prasher RS, Hu XJ, Chalopin Y, Mingo N, Lofgreen K, Volz S, Cleri F, Keblinski P. Turning carbon nanotubes from exceptional heat conductors into insulators. Phys Rev Lett. 2009 Mar 13;102(10):105901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.102.105901. Epub 2009 Mar 11. PMID: 19392127.

- [4] W.L.V. Price, The calculation of thermal conductivity and thermal diffusivity from transient heating measurements, Build. Environ. 18 (1983) 219–222. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(83\)90029-X](https://doi.org/10.1016/0360-1323(83)90029-X).

- Sciedirect, Heat Conduction. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/heat-conduction>

- Wikipedia, Thermal conduction. https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_conduction

- Sciedirect, Carbon Nanotubes. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/carbon-nanotubes>

- Wikipedia, Carbon Nanotubes. https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_nanotube

11.- RELACIÓ DE DOCUMENTS

- Document 0.- Resum
- Document 1.- Memòria
- Document 2.- Plànols
- Document 3.- Pressupost