

Treball Final de Grau

Estudi: Grau en Enginyeria Mecànica

Títol:

Obtenció dels punts de disseny d'un generador termoelèctric amb diferents dissipadors en convecció forçada.

Document: Número 1. Memòria i Annexos.

Alumne: Martí Roca Coldecarrera

Tutor: Toni Pujol Sagaró

Departament: Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Mecànica de Fluids

Convocatòria (mes/any): Juny 2018

ÍNDEX

1. INTRODUCCIÓ	4
1.1 ANTECEDENTS	4
1.2 OBJECTE	4
1.3 ABAST	5
2. MATERIALS I MÈTODES.....	6
2.1 APARELLS USATS.....	6
2.2 TEM	8
2.3 CONJUNT.....	9
2.4 PROTOCOL D'ASSAIG.....	10
2.4.1 PREPARACIÓ	10
2.4.2 PRESA DE DADES	15
3. RESULTATS EXPERIMENTALS	17
3.1 DADES	17
3.2 CÀLCUL D'ERRORS	21
3.3 COMPORTAMENT EN FUNCIO DE LA VELOCITAT	25
4. MODEL DE TEM AMB DISSIPACIÓ PER CONVECCIÓ FORÇADA.....	31
5. RESULTATS DEL MODEL.....	35
5.1 VALIDACIÓ	35
5.2 ALTRES CASOS	40
6. CONCLUSIONS.....	42
7. RELACIÓ DE DOCUMENTS	43
8. BIBLIOGRAFIA.....	44
ANNEX A. FITXES TÈCNIQUES.....	45
A.1 MÒDUL TERMOELÈCTRIC.....	45
A.3 REGULADOR ELECTRÒNIC	48
A.4 VENTILADOR.....	49
A.5 MATERIAL CERÀMIC MACOR	50
A.6 SENSOR DE PRESSIÓ	54

A.7 SENSOR DE VELOCITAT	67
A.8 SENSOR DE TEMPERATURA.....	68
ANNEX B. CÀLCULS	69
B.1 DIMENSIONS DISSIPADOR.....	69
B.2 MODEL TÈRMIC.....	69
B.3 MODEL TEM.....	74
B.4 POTÈNCIA DEL VENTILADOR.....	74
B.5 POTÈNCIA NETA	76

1. INTRODUCCIÓ

1.1 ANTECEDENTS

Els mòduls termoelèctrics comercials que funcionen com a generadors d'energia elèctrica són uns dispositius formats per un conjunt de pellets compostats per materials semiconductors de tipus p o n connectats elèctricament en sèrie i tèrmicament en paral·lel. Quan es manté una diferència de temperatures entre les seves cares, el flux de calor produeix una generació d'energia elèctrica gràcies a l'efecte Seebeck.

Recentment, aquests mòduls de generació termoelèctrica comercial (Thermoelectric modules o TEM) s'han utilitzat en una gran varietat de dispositius de construcció ben senzilla amb l'objectiu de disposar d'una pila d'energia elèctrica quan es mantenen les dues superfícies del TEM en un focus fred i un de calent.

El rendiment del TEM depèn, en gran mesura, de la diferència de temperatures (i, per tant del flux de calor) assolida en les seves cares. És per això que la dissipació de calor en el focus fred cap a l'ambient és molt important per tal de mantenir-lo a una temperatura reduïda i, per tant, assolir una alta generació d'energia elèctrica.

Tot i que en alguns casos la dissipació del focus fred es realitza mitjançant convecció natural, és més eficient una dissipació amb un mecanisme de convecció forçada, sobretot amb líquid a baixa temperatura. Tanmateix, en algunes aplicacions simples i robustes, la refrigeració líquida del focus fred no és aconsellable i s'ha optat per a una dissipació cap a l'ambient (aire) mitjançant dissipadors amb aletes i ventiladors (ventilació forçada).

Ara bé, el punt de disseny o de treball d'un generador termoelèctric que treballa en convecció forçada per dissipar calor al focus fred no ha de ser únicament la potència generada pel mòdul, sinó que ha d'incloure el balanç net de potència tenint en compte també l'energia consumida per accionar el ventilador.

1.2 OBJECTE

L'objecte del present estudi consisteix en obtenir experimentalment els punts de disseny d'un generador termoelèctric tenint en compte l'energia consumida per un sistema de dissipació de calor del focus fred en convecció forçada en aire.

1.3 ABAST

L'abast inclou la realització de diferents assajos experimentals al laboratori utilitzant diferents models de dissipadors plans d'aletes. S'obtindrà un punt de disseny per a cada dissipador estudiat i, en funció dels resultats obtinguts, es proposarà una regla de disseny per a cada dispositiu de generació termoelèctrica amb dissipadors en convecció forçada.

2. MATERIALS I MÈTODES

En aquest punt es presentaran els diferents aparells que s'utilitzen al laboratori així com els protocols a seguir per dur a terme l'assaig correctament.

2.1 APARELLS USATS

Per a l'assaig es requereixen un seguit d'aparells i sensors que permetran crear les millors condicions de treball alhora que permetran enregistrar les dades desitjades.

Aquests aparells utilitzats es detallen a la taula 1 següent.

Taula 1. Llista dels aparells utilitzats en l'assaig experimental.

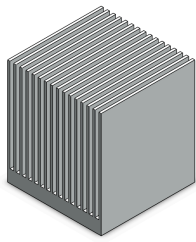
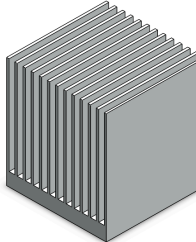
COMPONENT	FABRICANT	DESCRIPCIÓ D'ÚS
Ventilador	HELLA MARINE	Generar el flux d'aire.
Placa ceràmica	MACOR	Coneixement de propietats. Necessàries per a càlcul teòric.
Placa calefactora	JP SELECTA	Proporcionar calor al mòdul TEM.
Regulador electrònic	JP SELECTA	Control de la placa calefactora.
Sensor de temperatura	JP SELECTA	Mesurar la temperatura de la placa calefactora.
Sensors de pressió	SENSIRION	Mesurar la diferència de pressió del flux d'aire al pas del dissipador.
Kit d'avaluació de pressió	SENSIRION	Monitoritzar a l'ordinador el registre de lectures de pressió.
Sensor de velocitat	VELOPORT 20	Mesurar les diferents velocitats de l'aire de sortida.

Les característiques específiques dels elements de la taula 1 es detallen a l'Annex A. Fitxes tècniques.

A banda dels aparells anteriors, es necessita d'un dissipador de calor per tal de facilitar la pèrdua de calor de la cara freda del nostre TEM cap a l'exterior i així mantenir una diferència de temperatures elevada entre la cara freda i calenta del TEM.

Per al cas d'estudi, s'han utilitzat dos models de dissipadors lleugerament diferents. En la següent taula 2 s'especifiquen les característiques de cada un d'ells.

Taula 2. Dissipadors assajats al laboratori.

DISSIPADOR 1		DISSIPADOR 2	
			
Alçada aletes	30 mm	Alçada aletes	37 mm
Base	43 mm	Base	43 mm
Longitud	40 mm	Longitud	40 mm
Alçada base	7 mm	Alçada base	3 mm
Alçada bypass	3 mm	Alçada bypass	0 mm
Gruix aletes	1 mm	Gruix aletes	1 mm
Gruix canal int.	1,6 mm	Gruix canal int.	2,27 mm
Nº aletes	16	Nº aletes	12
Material	Alumini	Material	Alumini

En la figura 1 es mostra el muntatge utilitzat al laboratori per realitzar els diversos assajos.

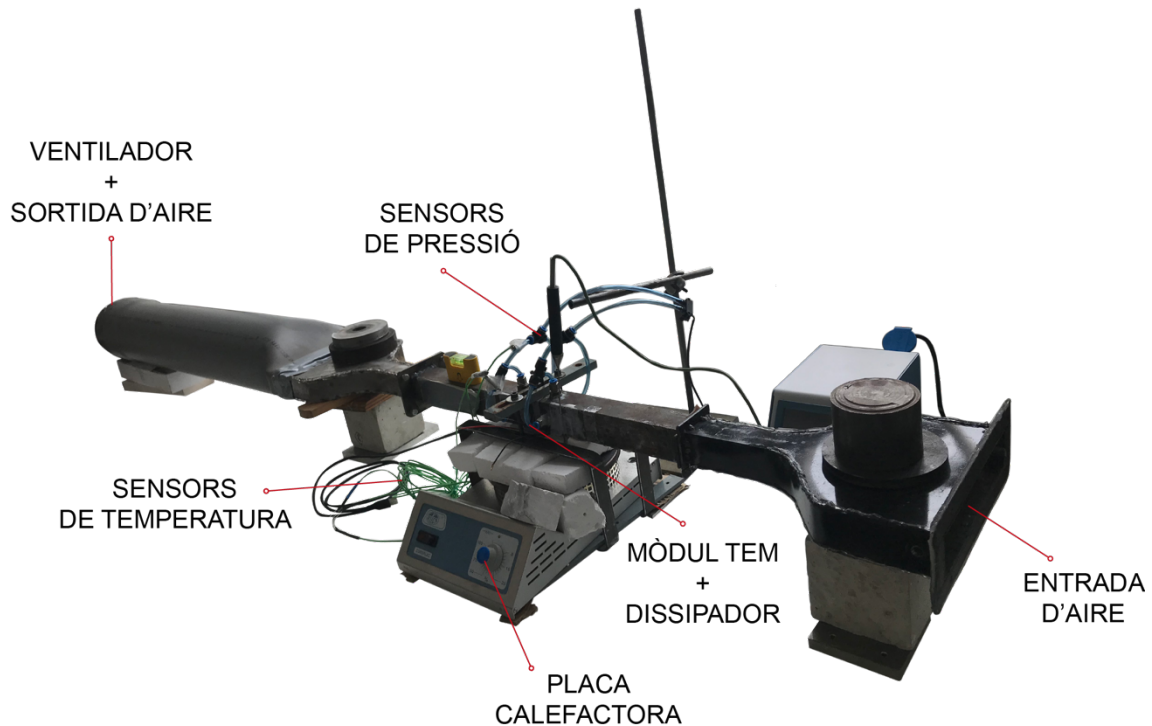


Figura 1. Conjunt utilitzat al laboratori.

2.2 TEM

Un mòdul termoelèctric té un principi de funcionament molt similar a un termoparell, que és un transductor format per la unió de dos metalls diferents que produeixen una diferència de potencial molt petita, de l'ordre de milivolts, que depèn de la diferència de temperatura dels dos extrems, denominats cara calenta i cara freda.

En la figura 2 adjunta a continuació es presenta de manera esquemàtica el funcionament d'un TEM.

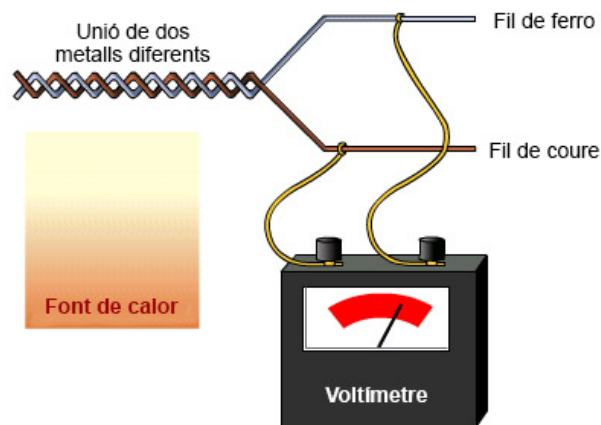


Figura 2. Esquema de funcionament d'un TEM.

L'efecte termoelèctric es basa en la conversió directa de temperatura a electricitat. Aquest fenomen rep el nom d'efecte Seebeck.

Els mòduls o plaques termoelèctriques s'aprofiten d'aquest efecte per generar un voltatge elèctric a partir de la diferència de temperatura que es manté entre les seves cares. La diferència de temperatura ΔT és directament proporcional al voltatge generat. El mòdul utilitzat en els assajos és el H-199-14-06-L2 de la marca CRYSTAL LTD i presenta les característiques de la figura 3.

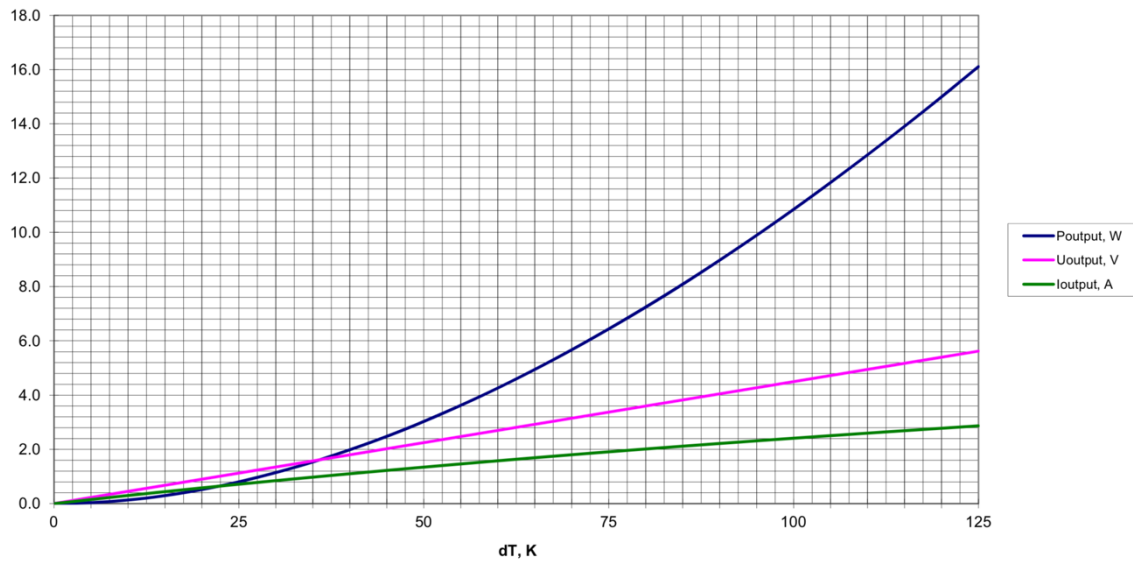


Figura 3. Potència (W), voltatge (V) i intensitat (A) del mòdul termoelèctric assajat en funció de la diferència de temperatures a les seves cares amb una temperatura de 150°C a la cara calenta i una resistència igual a la interna del mòdul.

En el gràfic es pot comprovar que quan més gran és la diferència de temperatura entre les cares del termoelèctric, major és la potència elèctrica [W] produïda.

Per tant doncs, per extreure el màxim rendiment d'un generador d'aquest tipus és molt important aconseguir una diferència de temperatura entre cares el més gran possible.

Per facilitar aquesta situació, s'utilitzaran els dissipadors de calor que s'han comentat en el punt anterior.

2.3 CONJUNT

Es col·loquen els aparells comentats anteriorment segons la seva funcionalitat i s'insereix el dissipador d'alumini a l'interior del tub rectangular que servirà de canal per a l'aire fred forçat, tal com mostra la figura 4 i, en la realitat, la figura 1. La cara freda del TEM es posa en contacte amb el dissipador.

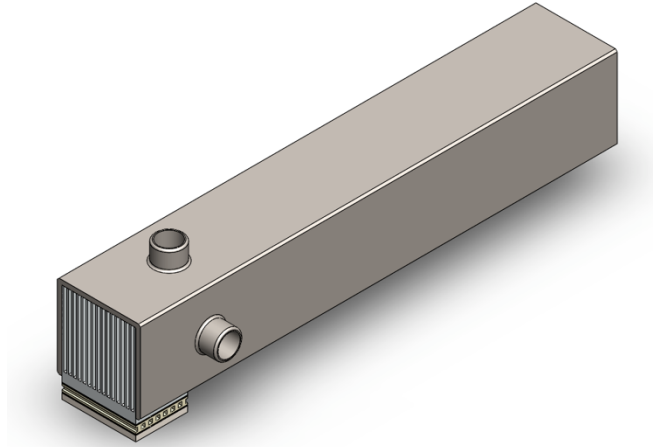


Figura 4. Secció del tub d'assaig on s'hi veu la col·locació del dissipador.

Entre la placa calefactora i la cara calenta del TEM es col·loca una placa d'un material ceràmic concret, anomenat Macor, del que es coneixen les seves propietats, entre les quals, la conductivitat tèrmica $[W/m \cdot K]$. Aquestes propietats s'especifiquen a l'Annex A. Fitxes Tècniques.

Amb aquesta informació es pot deduir quina serà la quantitat de calor per unitat de temps (flux de calor) que travessa el mòdul i així poder realitzar els càlculs teòrics que s'expliquen més endavant.

2.4 PROTOCOL D'ASSAIG

Per obtenir les dades experimentals de forma correcta i eficaç és imprescindible tenir clara la metodologia a seguir. Aquesta es detalla en aquest apartat.

2.4.1 PREPARACIÓ

En primer lloc, s'han de posar en marxa tots els elements que ho requereixin:

- Placa Calefactora: És el primer aparell que s'ha d'engegar, ja que és el que tardarà més en arribar a la seva condició òptima de treball.

En funció de la temperatura que es vulgui aconseguir a la cara calenta del mòdul termoelèctric, s'establirà una temperatura "X" que anirà variant al llarg de l'assaig. La temperatura que s'assigni a la placa calefactora no és important sempre que s'aconsegueixi que la temperatura de la cara calenta es mantingui constant o dintre un marge raonable.

- Font d'alimentació: És important connectar la font d'alimentació, i en conseqüència el ventilador, just després de la placa calefactora ja que la temperatura objectiu de la cara calenta del termoelèctric ha d'estar condicionada per l'efecte del flux d'aire generat pel ventilador. A més, si no es connecta la font d'alimentació que fa funcionar el ventilador, la cara freda del mòdul podria arribar a superar la màxima temperatura recomanable pel fabricant i es podria fer malbé (per exemple, dessoldant-se les unions de les connexions elèctriques). Si es comença un assaig des de zero, es fixarà el voltatge al màxim permès per l'aparell que es tingui connectat al laboratori. En el cas estudiat és 24V.
En cas de continuar amb un experiment amb un altra cabal d'aire, simplement establir el voltatge que pertoqui. En el nostre assaig el ventilador actua com a extractor del flux d'aire que circula per l'interior del dissipador.
- Mòdul d'adquisició DAQmx. Comprovar que els diferents sensors hi estan correctament connectats segons el tipus de variable que es vulgui mesurar. Els mòduls de National Instruments que es fan servir són:
 - NI 9211: Per mesurar la temperatura.
 - NI 9225: Per mesurar el voltatge.
 - NI 9227: Per mesurar la intensitat.
- Ordinador: Assegurar que les entrades USB dels diferents aparells estan correctament connectades a l'ordinador. Seguidament obrir el programa LabVIEW elaborat especialment per al treball i el programa SENSIRION de manera que quedin configurats com a les següents figures 5 i 6.

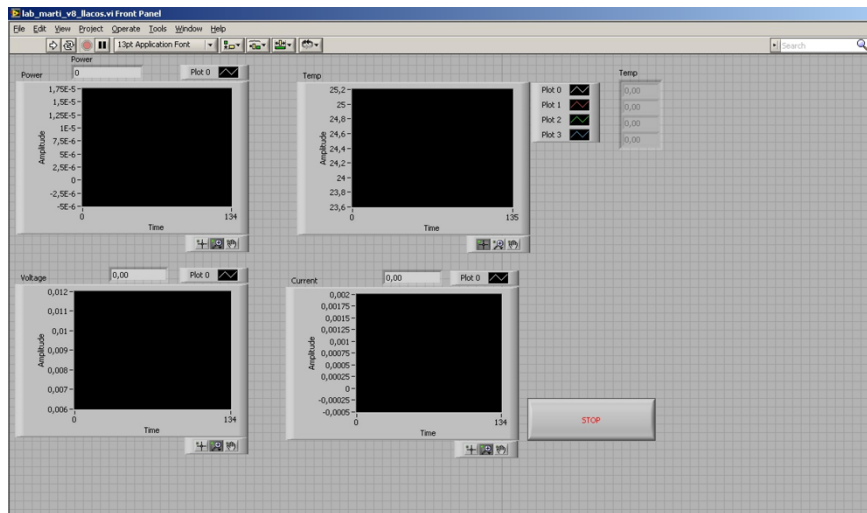


Figura 5. Pantalla del programa LabVIEW elaborat per a aquest treball on es visualitzen les dades d'intensitat, voltatge, potència i temperatura enregistrades durant l'assaig.

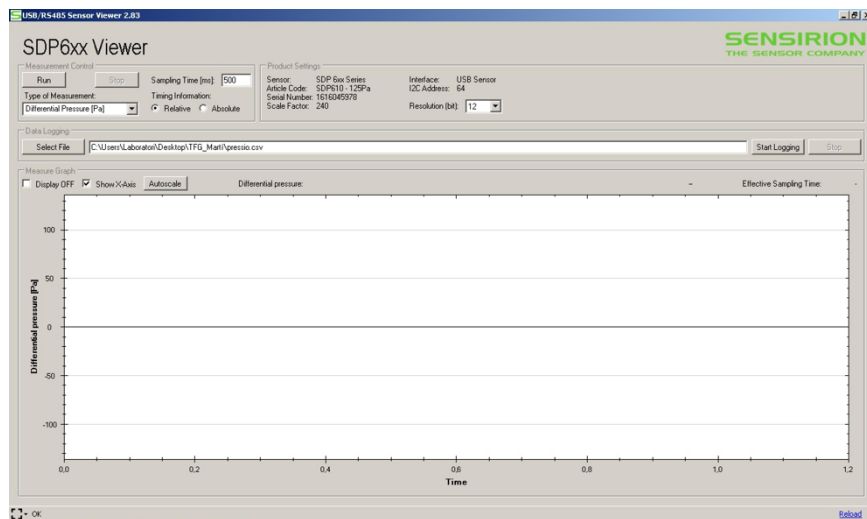


Figura 6. Pantalla del programa SENSIRION on es visualitzen les dades de pressió enregistrades durant l'assaig.

- Sensor de velocitat: El sensor de velocitat s'engegarà només a l'hora de fer la lectura de la velocitat de l'aire.
- Sensors de temperatura: Els sensors de temperatura, 4 termoparells del tipus K, mesuren la temperatura ambient, la temperatura de la placa calefactora, la

temperatura de la cara calenta del TEM i la temperatura de la cara freda del TEM. Com que el termoparell té un gruix de 0,25 mm, es col·loca una placa de llautó de 0,25 mm de gruix entre les superfícies on es vol mesurar la temperatura. Aquesta placa de llautó disposa d'una ranura que arriba fins al centre. Això permet inserir el termoparell i permetre que les dues superfícies tinguin un bon contacte.

El sensor de temperatura ambient es deixarà apartat del muntatge per tal d'evitar que es vegi influït per la calor generada durant l'assaig. La resta de sensors es col·locaran segons indica la següent figura 7.

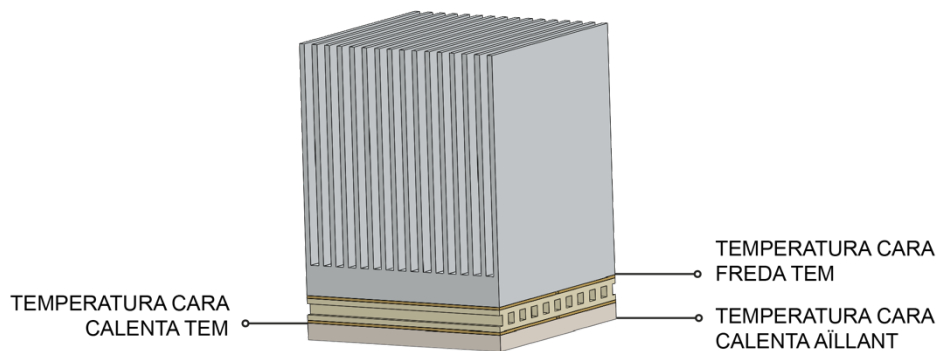


Figura 7. Col·locació d'on han d'anar els diferent sensors de temperatura.

- TEM: Comprovar que els dos cables estan correctament connectats a les respectives regletes elèctriques.
- Reòstat: Com s'ha fet amb el TEM, assegurar-se que les connexions estan ben fetes i que no hi cap cable desconnectat.

Quan els diferents aparells estiguin en marxa i en condicions de treball, es posen en marxa el software LabVIEW i el software SENSIRION i es comprova que, variant la resistència del reòstat els paràmetres elèctrics responen lògicament seguint la llei d'Ohm; i que la diferència de pressió canvia segons la velocitat en la que estigui el ventilador.

En cas que alguna cosa no funcioni correctament, el més probable és que hi hagi algun error amb les connexions elèctriques i s'hauran de revisar. Si tot funciona correctament, es deixarà el reòstat en posició de màxima resistència i el TEM en circuit obert. En la figura 8 es detalla com es troba aquesta posició

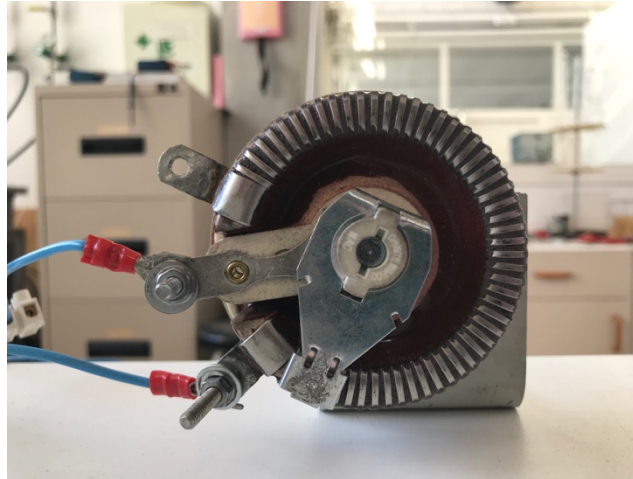


Figura 8. Reòstat utilitzat al laboratori.

En la figura 9 s'esquematitzen les connexions elèctriques del circuit utilitzat al laboratori.

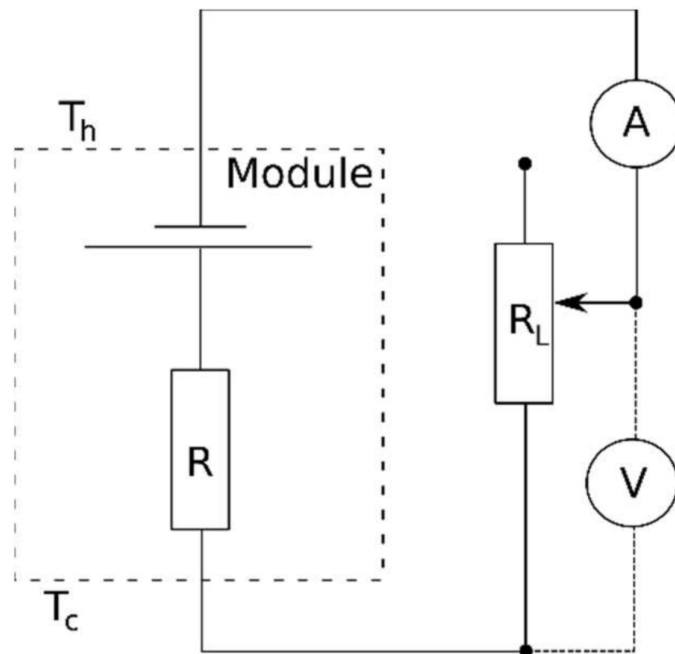


Figura 9. Esquema elèctric d'un TEM connectat a una resistència variable (R_L). T_h i T_c són les temperatures a la cara calenta i freda del mòdul respectivament. A i V indiquen la situació dels dispositius d'adquisició d'intensitat i voltatge respectivament (Ruiz et al., 2017).

2.4.2 PRESA DE DADES

Un cop es tinguin els diversos elements preparats per a la presa de dades, es començarà l'assaig.

En primer lloc s'iniciarà el programa SENSIRION i no es tocarà fins al final. Durant tot l'assaig recollirà la informació de la caiguda de pressió causada pel dissipador.

Seguidament, es posarà en marxa el programa LabVIEW per l'enregistrament de les dades elèctriques.

Es veurà que el programa comença a fer les lectures corresponents a una situació de circuit obert, ja que com s'ha comentat al punt anterior, s'ha deixat el TEM desconnectat del reòstat.

Quan es tinguin un mínim de 20 dades processades a una temperatura constant es passarà a variar la resistència. El primer cop, connectant el TEM al reòstat serà suficient. D'aquesta manera, es passarà de tenir un circuit obert a un circuit amb càrrega.

Amb el circuit connectat al reòstat, es començaran a enregistrar valors de potència generada pel TEM procurant que la temperatura sigui constant.

Altre cop, quan es tinguin un mínim de 20 dades processades a una temperatura constant, es canviarà el valor de la resistència a través del reòstat.

Durant l'assaig es registraran els casos següents i en l'ordre establert a continuació:

Circuit obert; 5 Ω ; 4,5 Ω ; 4,0 Ω ; 3,5 Ω ; 3 Ω ; 2,75 Ω ; 2,5 Ω ; 2,25 Ω ; 2,0 Ω ; 1,5 Ω ; 1,0 Ω ; 0,5 Ω i 0 Ω .

Per a coneixement pràctic, es sap que el punt màxim de potència es troba entre 3 Ω i 2 Ω . Per això, al voltant d'aquests valors es realitzen lectures en intervals de 0,25 Ω per tenir més informació sobre el punt màxim.

Un cop acabat el registre d'informació, es parará el LabVIEW juntament amb el SENSIRION.

Amb els programes aturats, es procedeix a fer la lectura de la velocitat de l'aire corresponent al voltatge escollit del ventilador. Per a això s'agafarà l'aparell de lectura (VELOPORT 20) i es col·locarà la part sensible d'aquest a l'entrada d'aire que es mostra

en la figura 1. En total es prenen 7 mesures en diferents posicions separades uniformement per tal de tenir una lectura més estable de la velocitat real.

Abans de guardar les dades del LabVIEW es procedirà a canviar el voltatge de la font d'alimentació (que regula la velocitat del ventilador) al que correspongui, a desconnectar el TEM del reòstat i a establir aquest últim un altre cop al valor de $5\ \Omega$. D'aquesta manera els elements queden preparats per al següent assaig.

Finalment cal guardar les dades de voltatge, intensitat, resistència i potència generades pel TEM. Per a això s'han d'exportar en una base de dades tipus Microsoft Excel i guardar-les en aquest format. A la figura 10 es mostra com s'ha de fer.

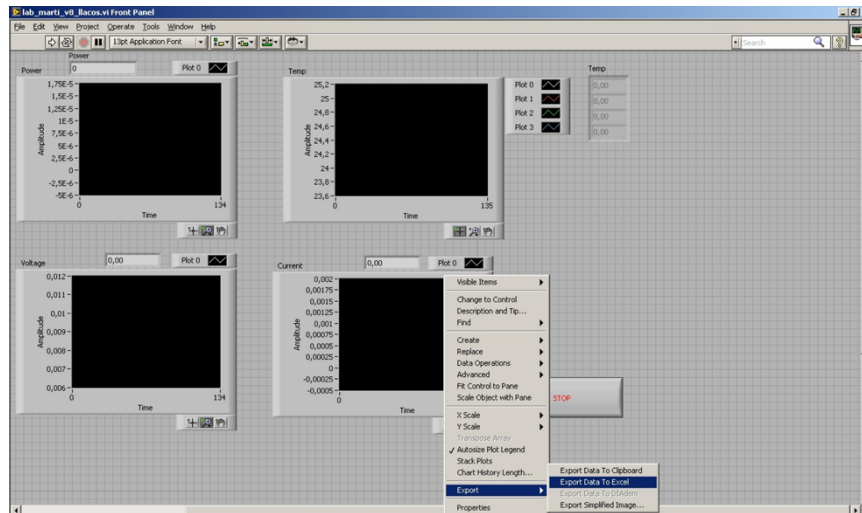


Figura 10. Guardar les dades enregistrades en format Microsoft Excel.

Amb les dades guardades, ja es tindrà el sistema preparat per la següent anàlisi. Com a única verificació, comprovar que la temperatura de la cara calenta del dissipador és la mateixa que en l'assaig anterior.

3. RESULTATS EXPERIMENTALS

3.1 DADES

A partir de les dades experimentals obtingudes mitjançant diversos assajos, s'han processat i analitzat els resultats obtinguts.

S'han agrupat en una taula tots els resultats referents a cada un dels voltatges de la font d'alimentació del ventilador [5 V – 24 V]. Posteriorment, per a cada voltatge assajat, s'han extret el valors de màxima potència elèctrica obtinguda amb el generador termoelèctric i els seus valors corresponents de temperatures a la cara calenta i freda. Per a cada dissipador, s'ha obtingut una taula on hi ha els valors màxims de potència elèctrica generada en cada voltatge del ventilador assajat. Les taules 3 i 4 següents mostren la informació un cop processada dels dissipadors 1 i 2 respectivament.

Taula 3. Resum de dades obtingudes en l'assaig del primer dissipador.

DADES VENTILADOR			DADES TEM			DADES TEMPERATURA			P. TOTAL
V_{dis}	ΔP	P_{fluid}	V_{TEM}	I_{TEM}	P_{TEM}	$T_{C,Aillant}$	$T_{C,TEM}$	$T_{F,TEM}$	P_{NETA}
m/s	Pa	W	V	A	W	°C	°C	°C	W
0,43	3,90	0,00	1,11	0,37	0,41	269,05	137,03	107,22	0,41
0,73	5,77	0,01	1,36	0,44	0,60	306,73	145,27	108,53	0,59
0,94	7,69	0,01	1,49	0,50	0,74	327,20	146,59	105,79	0,73
1,20	9,94	0,02	1,56	0,52	0,81	326,04	141,86	100,09	0,79
1,28	12,17	0,03	1,59	0,53	0,85	324,19	138,36	96,07	0,82
1,46	14,65	0,04	1,65	0,56	0,91	332,67	139,66	95,71	0,88
1,58	17,41	0,05	1,62	0,59	0,96	335,15	137,80	93,37	0,91
1,71	20,19	0,06	1,63	0,61	0,99	334,64	135,94	91,18	0,92
1,93	23,01	0,08	1,68	0,60	1,01	334,71	134,71	89,59	0,93
2,14	25,68	0,10	1,75	0,59	1,03	335,61	134,34	88,48	0,93
2,31	28,62	0,12	1,81	0,61	1,10	346,44	137,96	90,21	0,97
2,48	31,02	0,14	1,92	0,64	1,23	370,84	144,14	92,86	1,09
2,74	34,56	0,18	1,92	0,64	1,23	367,11	142,03	91,00	1,06
2,91	37,68	0,20	1,92	0,65	1,25	366,64	140,98	89,94	1,04
3,00	40,58	0,22	1,74	0,72	1,25	365,05	139,05	88,84	1,03
3,08	43,47	0,25	1,85	0,69	1,27	363,75	138,42	87,74	1,02
3,25	45,86	0,28	1,88	0,68	1,27	362,34	137,69	86,95	0,99
3,38	48,80	0,31	1,86	0,69	1,28	361,98	137,06	86,21	0,98
3,51	51,30	0,33	1,84	0,70	1,28	361,34	136,46	85,74	0,95
3,68	54,29	0,37	1,95	0,66	1,29	361,42	136,65	85,33	0,92

Taula 4. Resum de dades obtingudes en l'assaig del segon dissipador.

DADES VENTILADOR			DADES TEM			DADES TEMPERATURA			P. TOTAL
V_{dis}	ΔP	P_{fluid}	V_{TEM}	I_{TEM}	P_{TEM}	$T_{C,Aillant}$	$T_{C,TEM}$	$T_{F,TEM}$	P_{NETA}
m/s	Pa	W	V	A	W	°C	°C	°C	W
0,428	3,830	0,003	1,152	0,388	0,447	330,31	163,92	120,70	0,444
0,728	5,435	0,007	1,136	0,418	0,475	320,95	153,94	111,44	0,468
0,942	7,338	0,013	1,247	0,407	0,508	319,16	150,52	106,94	0,495
1,198	9,589	0,021	1,350	0,454	0,613	343,81	158,53	109,53	0,592
1,284	11,791	0,028	1,382	0,456	0,630	340,56	155,00	105,82	0,602
1,455	14,068	0,038	1,408	0,459	0,646	338,89	153,06	103,61	0,608
1,584	16,837	0,049	1,377	0,495	0,682	344,14	154,24	103,51	0,632
1,712	19,600	0,062	1,469	0,493	0,724	350,57	155,68	102,94	0,662
1,926	22,524	0,080	1,507	0,490	0,738	350,03	154,47	101,37	0,658
2,140	25,283	0,100	1,446	0,519	0,750	349,13	152,79	99,96	0,650
2,311	28,224	0,121	1,503	0,505	0,759	348,11	151,81	98,57	0,638
2,482	31,353	0,144	1,511	0,508	0,768	347,49	150,85	97,51	0,624
2,739	34,281	0,174	1,521	0,512	0,779				0,605
2,910	37,771	0,203	1,450	0,539	0,782	345,08	148,15	95,08	0,578
2,996	39,578	0,219	1,541	0,517	0,797	345,96	148,45	94,53	0,577
3,082	42,516	0,242	1,567	0,511	0,801	345,24	147,69	93,69	0,558
3,253	45,453	0,273	1,564	0,517	0,809	345,17	147,24	93,05	0,535
3,381	48,447	0,303	1,587	0,516	0,819	344,94	146,67	92,30	0,516
3,510	51,115	0,332	1,547	0,529	0,818	344,58	145,99	91,07	0,487
3,681	53,720	0,366	1,577	0,530	0,836	343,87	145,45	90,56	0,470

On:

- V_{dis} : Indica la velocitat [m/s] de l'aire en el punt d'entrada al dissipador. Es calcula a partir del cabal d'entrada en el conducte Q_E .

$$Q_E = V_E \cdot A_E \quad (1)$$

On:

- Q_E : És el cabal d'entrada [m^3/s] en el conducte.
- V_E : És la velocitat d'entrada [m/s] en el conducte. Es mesura experimentalment durant l'assaig.
- A_E : És la secció del conducte [m^2] a l'entrada. Es mesura experimentalment.

Sabent que Q_E [m^3/s] és constant en el tram d'entrada (on la temperatura de l'aire no varia apreciablement), es pot determinar la velocitat en el conducte de secció quadrada a l'entrada del dissipador com a:

$$Q_E = V_{dis} \cdot A_D \quad (2)$$

On:

- Q_E : És el cabal d'entrada [m^3/s] en el conducte. Ja conegut en l'expressió anterior (1).
 - V_{dis} : És la velocitat en el conducte de secció quadrada a l'entrada del dissipador [m/s]. Variable que s'està calculant.
 - A_D : És la secció del conducte [m^2] quadrat. Es mesura experimentalment.
- ΔP : Indica el valor de pèrdua de pressió [Pa] al pas del dissipador. Es mesura experimentalment.
- P_{fluid} : La potència hidràulica comunicada al fluid [W] necessària per fer moure l'aire a través del dissipador. És molt important saber que la potència elèctrica consumida pel ventilador inclou la potència utilitzada per fer circular el flux d'aire a través de tot el muntatge, i no només a través de les aletes del dissipador. Per al cas d'estudi, únicament es requereix conèixer quina és la potència necessària per generar el moviment d'aire a través del dissipador.

Es pot calcular com:

$$P_{fluid} = V_{dis} \cdot \Delta P \quad (3)$$

On:

- P_{Fluid} : És la potència hidràulica [W] que s'està calculant.
 - V_{dis} : És la velocitat en el conducte de secció quadrada a l'entrada del dissipador [m/s]. Obtinguda a l'equació (2) anterior.
 - ΔP : Indica el valor de pèrdua de pressió [Pa] al pas del dissipador. Es mesura experimentalment.
- V_{TEM} : Indica el valor de voltatge [V] produït pel TEM. Es mesura experimentalment.
- I_{TEM} : Indica el valor d'intensitat [A] produïda pel TEM. Es mesura experimentalment.

- P_{TEM} : Indica el valor de potència [W] produïda pel TEM. Es calcula a partir de:

$$P_{TEM} = V_{TEM} \cdot I_{TEM} \quad (4)$$

- $T_{C.Aïllant}$: Indica el valor de la temperatura [°C] entre la placa calefactora i el material ceràmic. A la figura 7 es mostra el punt on s'ha fet la lectura.
- $T_{C.TEM}$: Indica el valor de la temperatura [°C] de la cara calenta del mòdul termoelèctric. A la figura 7 es mostra el punt on s'ha fet la lectura.
- $T_{F.TEM}$: Indica el valor de la temperatura [°C] de la cara fred del mòdul termoelèctric. A la figura 7 es mostra el punt on s'ha fet la lectura.
- P_{NETA} : Indica el valor de la potència [W] neta generada pel generador termoelèctric tenint en compte l'energia consumida per tal de generar el flux d'aire que circula pel dissipador. Es calcula a partir de:

$$P_{NETA} = P_{TEM} - P_{Fluid} \quad (5)$$

On:

- P_{NETA} : És la potència neta [W] que s'està calculant.
- P_{TEM} : És la potència [W] produïda pel TEM. S'ha calculat a l'equació (3).
- P_{Fluid} : És la potència hidràulica [W] consumida per moure l'aire. S'ha calculat a l'equació (4).

3.2 CÀLCUL D'ERRORS

Totes les dades obtingudes experimentalment han estat enregistrades per aparells específics per a cada variable. Aquests aparells mesuren les variables amb una exactitud determinada que aquí s'utilitzarà per calcular part de l'error de la mesura. L'altra part de l'error estarà associada al fet que el valor esperat correspon a una mitjana de la mostra de les dades enregistrades.

Per definir l'interval d'acceptació per a cada una de les variables experimentals registrades s'utilitza l'anomenat tipus descriptiu amb una contribució additiva de l'exactitud de l'aparell i l'estimació estadística. Quan el valor d'incertesa de l'exactitud de l'aparell és molt petit enfront de la variabilitat de les mostres de dades, l'interval seguirà la següent expressió:

$$\delta (X) = 2 \cdot \sigma_X \quad (6)$$

On:

- $\delta (X)$: És l'error absolut per a una variable X suposada.
- σ_X : És la desviació estàndard del conjunt de dades X S'associarà a una mesura del grau de dispersió associat a l'aparell per mesurar el nostre valor.

A partir de l'equació (6) s'admet que un 95,4% de les dades es trobaran dins de $\delta (X)$ i que, aproximadament, la mitjana real de la població es trobarà amb un 95.4% de confiança dins l'interval $\delta (X)/20^{1/2}$ ja que la mostra disposa de 20 dades. Aquí identifiquem la incertesa i l'anomenem error al valor obtingut en l'equació (6) si la incertesa de l'exactitud de l'aparell es petita. Es plantegen els diferents errors per a cada variable de les taules 3 i 4.

Seguint l'equació (6) es plantegen els errors de les variables obtingudes directament durant l'experiment. Aquestes són: V_{TEM} , I_{TEM} , $T_{C.Aïllant}$, $T_{C.TEM}$, $T_{F.TEM}$.

Per la potència generada pel TEM es té en compte que el valor d'aquesta prové de dues variables amb error propi. Per obtenir l'error de P_{TEM} s'aplica:

$$\delta (P_{TEM}) = V_{TEM_M} \cdot 2 \cdot \sigma_{I_{TEM}} + I_{TEM_M} \cdot 2 \cdot \sigma_{V_{TEM}} \quad (7)$$

On:

- V_{TEM_M} : És la mitjana aritmètica del voltatge [V] generat pel TEM.
- I_{TEM_M} : És la mitjana aritmètica d'intensitat [A] generada pel el TEM.
- $\sigma_{V_{TEM}}$: És la desviació estàndard [V] del conjunt de dades de voltatge.
- $\sigma_{I_{TEM}}$: És la desviació estàndard [A] del conjunt de dades d'intensitat.

Per a la velocitat, el fabricant informa de les característiques del seu aparell que disposa d'una elevada incertesa en l'exactitud. Per això l'error queda definit amb els següents valors proporcionats:

$$\delta(v_{dis_m}) = 0,04 \frac{m}{s} \pm \frac{1}{100} \cdot v_{dis_m} \quad (8)$$

On:

- v_{dis_m} : És la mitjana aritmètica de la velocitat [m/s] de mesura.

Per a la diferència de pressió, al disposar d'un conjunt de dades i de la sensibilitat pròpia de l'aparell donada pel fabricant, la incertesa de la diferència de pressió és dedueix com:

$$\delta(\Delta P) = 0,1 + 0,03 \cdot \Delta P_M + \Delta P_M + 2 \cdot \sigma_{\Delta P} \quad (9)$$

On:

- ΔP_M : És la mitjana aritmètica de la mostra de dades enregistrades de la diferència de pressió [Pa].
- $\sigma_{\Delta P}$: És la desviació estàndard de la mostra de dades enregistrades de la diferència de pressió [Pa].

A partir de l'error obtingut per a cada una de les variables, es calcula quin és l'error relatiu, en tan per cent, per tal de veure'n el grau d'influència sobre la lectura real.

$$\varepsilon(X) = \frac{2 \cdot \sigma_X}{X_M} \cdot 100 \quad (10)$$

On:

- $\varepsilon(X)$: És l'error relatiu (%) per a un conjunt de dades X.

- σ_X : És la desviació estàndard del conjunt de dades X. Serà proporcional a la incertesa de la dada mesurada.
- X_M : És la mitjana aritmètica d'un conjunt de dades X.

Taula 5. Incertesa de lectura per al primer dissipador.

DADES VENTILADOR						DADES TEM					
V_{dis}	Error V_{dis}	ΔP	Error ΔP	P_{fluid}	Error P_{fluid}	V_{TEM}	Error V_{TEM}	I_{TEM}	Error I_{TEM}	P_{TEM}	Error P_{TEM}
m/s	m/s	Pa	Pa	W	W	V	V	A	A	W	W
0,428	0,041	3,895	0,072	0,003	0,000	1,108	0,003	0,374	0,008	0,414	0,010
0,728	0,041	5,767	0,094	0,008	0,001	1,356	0,009	0,443	0,003	0,601	0,008
0,942	0,042	7,691	0,120	0,013	0,001	1,487	0,010	0,501	0,002	0,745	0,008
1,198	0,042	9,941	0,155	0,022	0,001	1,555	0,009	0,520	0,002	0,809	0,008
1,284	0,040	12,169	0,192	0,029	0,001	1,589	0,010	0,533	0,003	0,847	0,010
1,455	0,040	14,645	0,239	0,039	0,002	1,648	0,014	0,555	0,004	0,915	0,014
1,584	0,043	17,413	0,328	0,051	0,002	1,619	0,006	0,594	0,001	0,962	0,005
1,712	0,043	20,187	0,351	0,064	0,003	1,630	0,005	0,606	0,002	0,988	0,006
1,926	0,044	23,010	0,408	0,082	0,003	1,680	0,003	0,601	0,001	1,010	0,003
2,140	0,045	25,679	0,419	0,102	0,004	1,750	0,012	0,590	0,004	1,033	0,014
2,311	0,045	28,616	0,574	0,122	0,005	1,810	0,014	0,606	0,004	1,097	0,016
2,482	0,045	31,021	0,601	0,142	0,005	1,915	0,010	0,643	0,004	1,231	0,014
2,739	0,046	34,557	0,706	0,175	0,007	1,917	0,010	0,644	0,004	1,235	0,014
2,910	0,046	37,680	0,797	0,203	0,007	1,923	0,007	0,648	0,002	1,246	0,008
2,996	0,047	40,584	0,861	0,225	0,008	1,737	0,004	0,720	0,002	1,251	0,006
3,082	0,047	43,471	1,021	0,248	0,010	1,848	0,008	0,686	0,003	1,268	0,011
3,253	0,047	45,855	1,038	0,276	0,010	1,880	0,008	0,675	0,004	1,269	0,013
3,381	0,047	48,799	1,179	0,305	0,012	1,862	0,008	0,688	0,003	1,281	0,011
3,510	0,048	51,304	1,182	0,333	0,012	1,843	0,037	0,696	0,011	1,283	0,046
3,681	0,048	54,287	1,373	0,369	0,014	1,954	0,012	0,660	0,004	1,290	0,016

Taula 6. Incertesa de lectura per al primer dissipador.

DADES TEMPERATURA					
$T_{C,AirInt}$	Error $T_{C,AirInt}$	$T_{C,TEM}$	Error $T_{C,TEM}$	$T_{F,TEM}$	Error $T_{F,TEM}$
°C	°C	°C	°C	°C	°C
202,38	0,51	137,03	0,33	107,22	0,11
229,83	0,68	145,27	0,33	108,53	0,14
244,65	0,05	146,59	0,14	105,79	0,13
243,81	0,06	141,86	0,15	100,09	0,11
242,48	0,06	138,36	0,23	96,07	0,09
248,58	0,90	139,66	0,36	95,71	0,09
250,36	0,04	137,80	0,11	93,37	0,08
250,00	0,09	135,94	0,16	91,18	0,06
250,04	0,05	134,71	0,10	89,59	0,06
250,69	0,08	134,34	0,19	88,48	0,06
258,43	0,74	137,96	0,50	90,21	0,14
275,59	0,06	144,14	0,25	92,86	0,08
272,99	0,07	142,03	0,23	91,00	0,05
272,67	0,14	140,98	0,22	89,94	0,09
271,56	0,05	139,05	0,16	88,84	0,06
270,65	0,08	138,42	0,12	87,74	0,07
269,66	0,08	137,69	0,09	86,95	0,10
269,40	0,09	137,06	0,18	86,21	0,06
268,96	0,11	136,46	0,23	85,74	0,12
269,02	0,14	136,65	0,38	85,33	0,06

Taula 7. Incertesa de lectura per al segon dissipador.

DADES VENTILADOR						DADES TEM					
V_{dis}	Error V_{dis}	ΔP	Error ΔP	P_{fluid}	Error P_{fluid}	V_{TEM}	Error V_{TEM}	I_{TEM}	Error I_{TEM}	P_{TEM}	Error P_{TEM}
m/s	m/s	Pa	Pa	W	W	V	V	A	A	W	W
0,428	0,041	3,830	0,066	0,003	0,000	1,152	0,005	0,388	0,002	0,447	0,004
0,728	0,041	5,435	0,116	0,007	0,001	1,136	0,006	0,418	0,003	0,475	0,006
0,942	0,042	7,338	0,134	0,013	0,001	1,247	0,008	0,407	0,002	0,508	0,006
1,198	0,042	9,589	0,167	0,021	0,001	1,350	0,009	0,454	0,003	0,613	0,008
1,284	0,040	11,791	0,245	0,028	0,001	1,382	0,009	0,456	0,001	0,630	0,005
1,455	0,040	14,068	0,233	0,038	0,002	1,408	0,006	0,459	0,002	0,646	0,006
1,584	0,043	16,837	0,295	0,049	0,002	1,377	0,007	0,495	0,002	0,682	0,006
1,712	0,043	19,600	0,381	0,062	0,003	1,469	0,008	0,493	0,001	0,724	0,005
1,926	0,044	22,524	0,448	0,080	0,003	1,507	0,002	0,490	0,007	0,738	0,012
2,140	0,045	25,283	0,486	0,100	0,004	1,446	0,007	0,519	0,001	0,750	0,005
2,311	0,045	28,224	0,634	0,121	0,005	1,503	0,005	0,505	0,001	0,759	0,004
2,482	0,045	31,353	0,678	0,144	0,006	1,511	0,008	0,508	0,002	0,768	0,007
2,739	0,046	34,281	0,729	0,174	0,007	1,521	0,009	0,512	0,003	0,779	0,009
2,910	0,046	37,771	0,825	0,203	0,008	1,450	0,006	0,539	0,002	0,782	0,006
2,996	0,047	39,578	0,821	0,219	0,008	1,541	0,011	0,517	0,004	0,797	0,012
3,082	0,047	42,516	1,030	0,242	0,010	1,567	0,006	0,511	0,002	0,801	0,006
3,253	0,047	45,453	1,105	0,273	0,011	1,564	0,010	0,517	0,002	0,809	0,008
3,381	0,047	48,447	1,231	0,303	0,012	1,587	0,008	0,516	0,003	0,819	0,009
3,510	0,048	51,115	1,282	0,332	0,013	1,547	0,011	0,529	0,002	0,818	0,009
3,681	0,048	53,720	1,385	0,366	0,014	1,577	0,010	0,530	0,003	0,836	0,010

Taula 8. Incertesa de lectura per al segon dissipador.

DADES TEMPERATURA					
$T_{C,Allant}$	Error $T_{C,Allant}$	$T_{C,TEM}$	Error $T_{C,TEM}$	$T_{F,TEM}$	Error $T_{F,TEM}$
°C	°C	°C	°C	°C	°C
330,31	0,24	163,92	0,07	120,70	0,14
320,95	0,12	153,94	0,08	111,44	0,12
319,16	0,32	150,52	0,30	106,94	0,17
343,81	0,14	158,53	0,11	109,53	0,10
340,56	0,07	155,00	0,26	105,82	0,11
338,89	0,18	153,06	0,25	103,61	0,13
344,14	0,17	154,24	0,26	103,51	0,08
350,57	0,10	155,68	0,18	102,94	0,10
350,03	0,06	154,47	0,18	101,37	0,04
349,13	0,12	152,79	0,15	99,96	0,10
348,11	0,07	151,81	0,17	98,57	0,05
347,49	0,11	150,85	0,25	97,51	0,05
346,87	0,05	150,32	0,24	96,45	0,07
345,08	0,06	148,15	0,15	95,08	0,07
345,96	0,13	148,45	0,29	94,53	0,13
345,24	0,09	147,69	0,13	93,69	0,10
345,17	0,13	147,24	0,30	93,05	0,09
344,94	0,06	146,67	0,20	92,30	0,08
344,58	0,12	145,99	0,33	91,07	0,10
343,87	0,07	145,45	0,27	90,56	0,13

A partir de les taules 5, 6, 7 i 8 es pot calcular l'error relatiu per a cada una de les mesures que hi figuren segons l'equació (10). S'observa que es donen errors més significants en les lectures inicials de velocitat i pressió amb un error relatiu del 11,30% en la primera lectura de velocitat com a la més desfavorable. Aquesta tendència es veu ràpidament reduïda a mesura que l'experiment avança i les condicions es tornen més estables.

Cal remarcar que, a banda del moment inicial que és puntual, per a tots els conjunts de dades hi ha un error que es situa dins l'interval del [0,00% , 2,50%]. Per això es considera que les dades registrades tenen un grau d'incertesa reduït.

3.3 COMPORTAMENT EN FUNCIO DE LA VELOCITAT

A partir de les taules 3 i 4 anteriors, s'han extret les gràfiques següents on s'observa el comportament del dissipador i del TEM per a diferents variables en funció de la velocitat que circula per les aletes del dissipador.

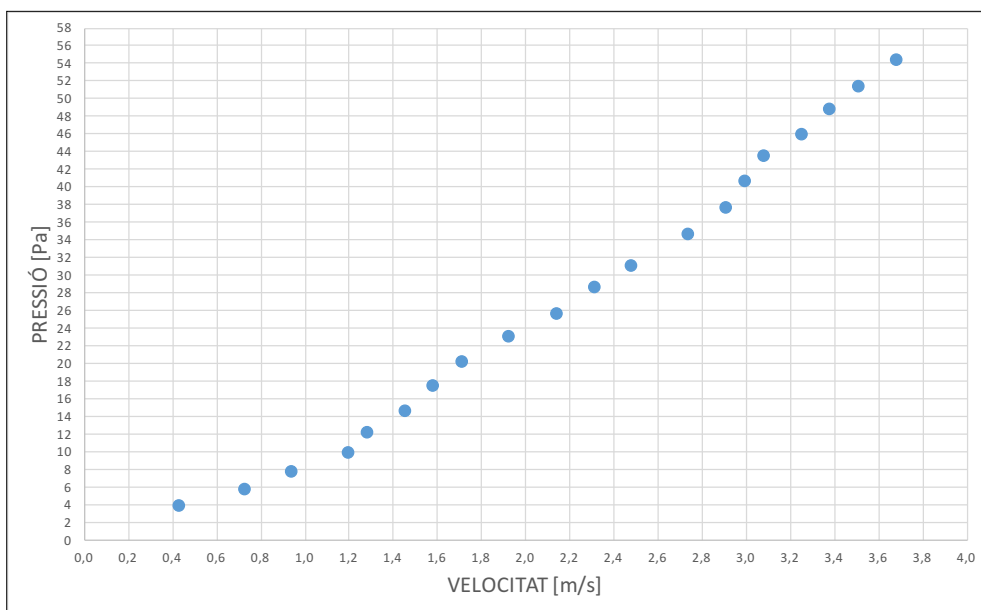


Figura 11. Primer dissipador: Variació de pressió al pas pel dissipador – Velocitat.

En la figura 11, que fa referència al primer dissipador, s'observa que quant més gran és la velocitat en el conducte, la pèrdua de càrrega al pas del dissipador augmenta de forma no-lineal. Aquesta pèrdua de càrrega hauria de ser gairebé proporcional al quadrat de la velocitat d'acord amb l'equació de Darcy-Weisbach si el flux fos turbulent i gairebé lineal (comportament no observat) si el flux fos laminar.

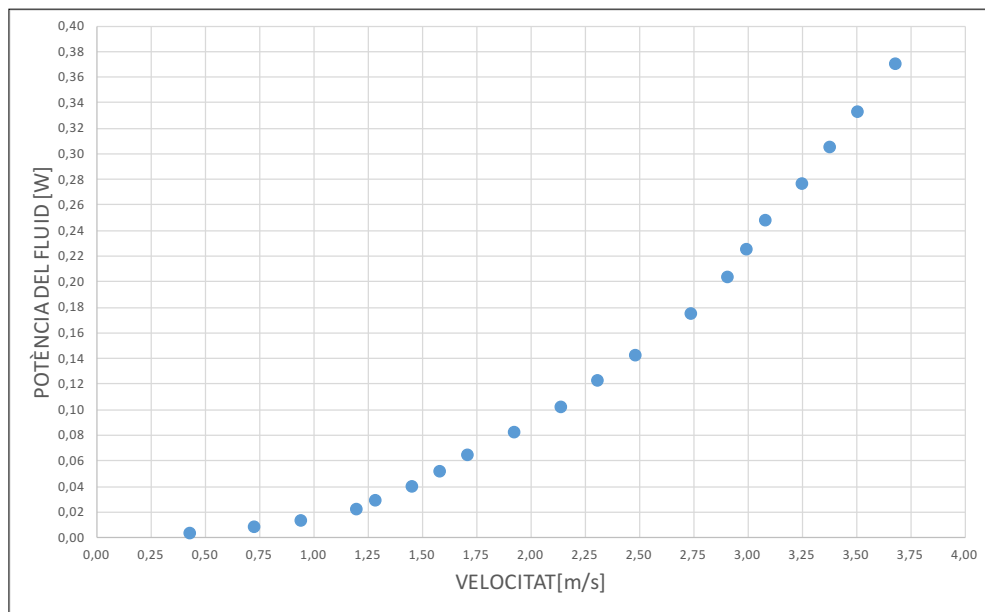


Figura 12. Primer dissipador: Potència del fluid – Velocitat.

La potència necessària per moure el fluid al pas del primer dissipador en funció de la seva velocitat mitjana es mostra en la figura 12. La potència del fluid es calcula a partir de l'equació (3) d'on s'observa que acaba sent una funció proporcional al cub de la velocitat (si el flux és turbulent) o al quadrat d'aquesta (si el flux és laminar). Ambdós tipus de corbes (quadràtica o cúbica) es podria ajustar a les dades observades però el comportament no-lineal observat a la figura 11 fa pensar que el flux no és laminar (tal i com es corrobora quan es realitza el model numèric).

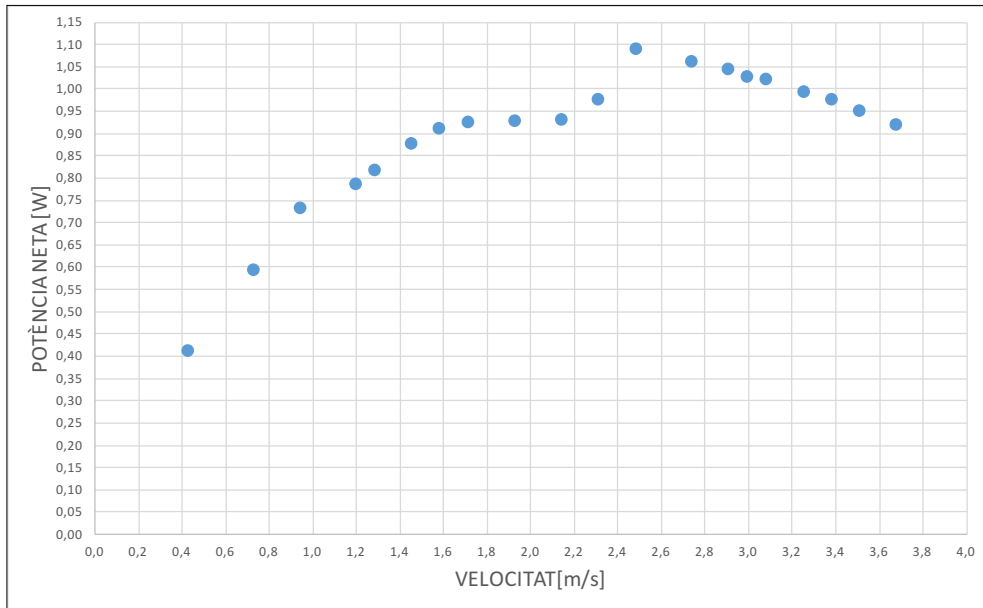


Figura 13. Primer dissipador: Potència neta – Velocitat.

La potència neta generada pel TEM en funció de la velocitat del fluid es mostra a la figura 13. La potència neta total es calcula seguint l'equació (5). Cal destacar que hi ha una velocitat intermèdia on la potència neta del dispositiu és màxima. Per a més velocitat, la dissipació augmenta i, per tant, també ho fa la producció d'electricitat del TEM però l'energia necessària per fer moure l'aire del dissipador augmenta en major mesura.

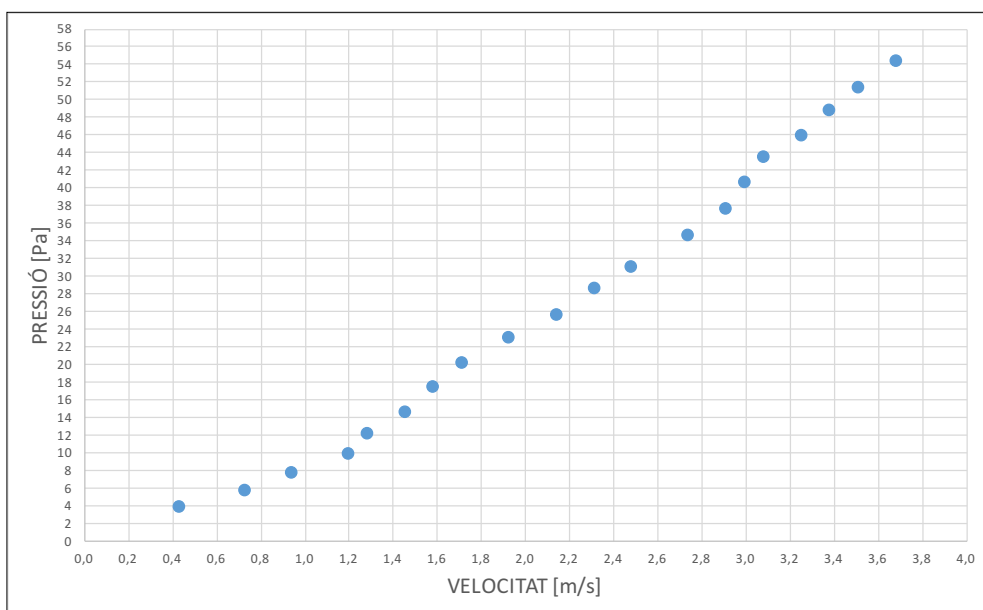


Figura 14. Segon dissipador: Variació de pressió al pas pel dissipador – Velocitat.

En la figura 14, que fa referència al segon dissipador, s'observa que quant més gran és la velocitat en el conducte, la pèrdua de càrrega al pas del dissipador augmenta de forma no-lineal. Aquesta pèrdua de càrrega hauria de ser gairebé proporcional al quadrat de la velocitat d'acord amb l'equació de Darcy-Weisbach si el flux fos turbulent i gairebé lineal (comportament no observat) si el flux fos laminar.

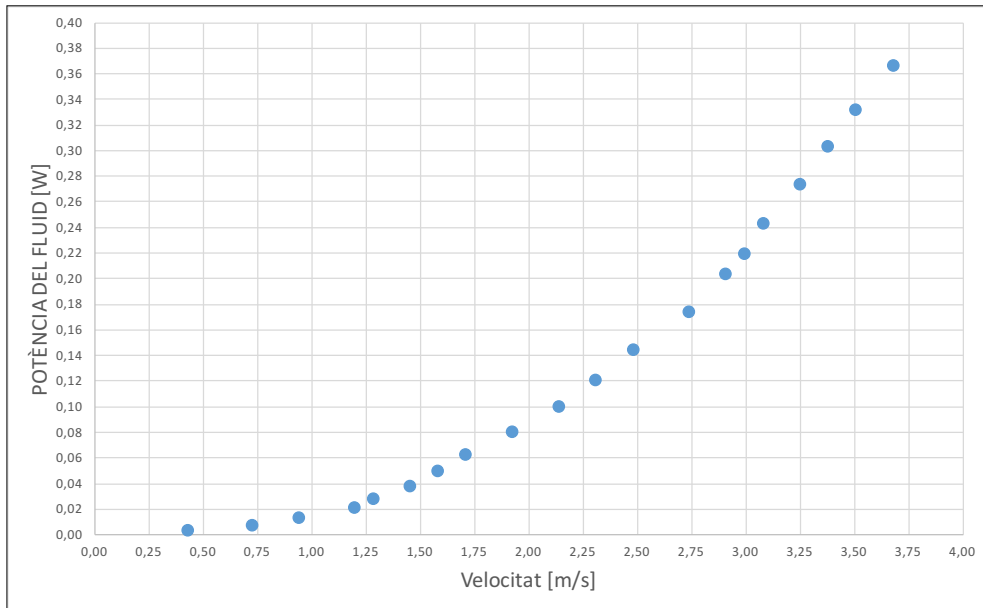


Figura 15. Segon dissipador: Potència del fluid – Velocitat.

La potència necessària per moure el fluid al pas del segon dissipador en funció de la seva velocitat mitjana es mostra en la figura 15. La potència del fluid es calcula a partir de l'equació (3) d'on s'observa que acaba sent una funció proporcional al cub de la velocitat (si el flux és turbulent) o al quadrat d'aquesta (si el flux és laminar). Ambdós tipus de corbes (quadràtica o cúbica) es podria ajustar a les dades observades però el comportament no-lineal observat a la figura 14 fa pensar que el flux no és laminar (tal i com es corrobora quan es realitza el model numèric).

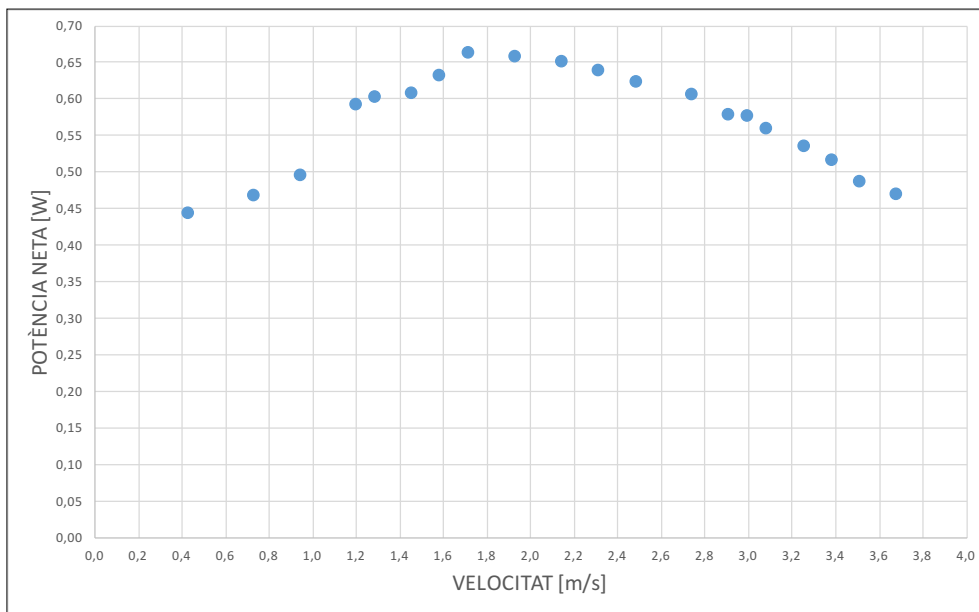


Figura 16. Segon dissipador: Potència neta – Velocitat.

La potència neta generada pel TEM en funció de la velocitat del fluid es mostra a la figura 16. La potència neta total es calcula seguint l'equació (5). Cal destacar que hi ha una velocitat intermèdia on la potència neta del dispositiu és màxima. Per a més velocitat, la dissipació augmenta i, per tant, també ho fa la producció d'electricitat del TEM però l'energia necessària per fer moure l'aire del dissipador augmenta en major mesura.

Les figures 13 i 16 mostren les corbes de treball dels dissipadors assajats 1 i 2 (informació a la taula 2) respectivament.

Una velocitat baixa no produeix una correcta refrigeració de temperatura de la cara calenta i la potència generada pel termoelèctric és baixa; en canvi una velocitat massa elevada, tot i refrigerar bé la cara freda del termoelèctric produeix una pèrdua de càrrega molt important al pas del dissipador, fet que requereix una potència elevada per moure el fluid.

Aquests resultats experimentals mostren que cada dissipador, utilitzat com a refrigerador de la cara freda d'un generador termoelèctric en convecció forçada, disposa d'un punt òptim de funcionament. En els dos casos estudiats aquest punt per a la temperatura fixada al focus calent com a l'assaig és:

Primer dissipador assajat:

- S'ha obtingut una potència neta màxima produïda de 1,09 [W] per a una velocitat de flux d'aire de 2,48 [m/s] amb una relació d'eficiència respecte la potència màxima produïda pel TEM del 88,62%.

Segon dissipador assajat:

- S'ha obtingut una potència neta màxima produïda de 0,66 [W] per a una velocitat de flux d'aire de 1,71 [m/s] amb una relació d'eficiència respecte la potència màxima produïda pel TEM del 91,43%.

Tot i que el primer dissipador produeix un valor de potència neta més elevat que el segon, la potència del fluid requerida en el primer cas provoca que la relació d'eficiència sigui més favorable per el segon dissipador.

A continuació es desenvolupa un model analític per tal d'intentar predir el punt òptim de funcionament d'un dissipador d'aletes aplicat a la cara freda d'un generador termoelèctric i funcionant en convecció forçada. El model analític del dissipador està basat en l'estudiat per Lindstedt i Karvinen (Lindstedt et al., 2012) que no incorporaven cap element termoelèctric.

4. MODEL DE TEM AMB DISSIPACIÓ PER CONVECCIÓ FORÇADA

Com s'ha comentat anteriorment, per poder extreure una regla de disseny per a futurs dissipadors, s'ha desenvolupat un model analític basat en un estudi sobre l'optimització de dissipadors d'aletes per a règims laminars i turbulents en convecció forçada (Lindstedt et al., 2012).

Abans d'aplicar-lo a diferents dissipadors, es comprovarà que aquest model teòric doni uns resultats semblants als obtinguts experimentalment amb els dos dissipadors. En aquest apartat es defineix el model analític emprat.

El model tèrmic estudiat consisteix en un seguit de resistències tèrmiques que van des de la base del material ceràmic utilitzat per mesurar el flux de calor fins a l'aire forçat ambient.

En la figura 17 es defineixen les diferents resistències tèrmiques.

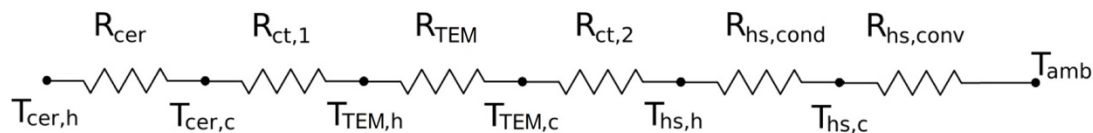


Figura 17. Model de resistències tèrmiques en sèrie del model TEM estudiat.

A la següent taula s'especifica cada resistència del model tèrmic anterior.

Taula 9. Resistències tèrmiques que utilitza el model.

Variable	Descripció	Mecanisme	Unitats
R_{cer}	Resistència tèrmica ceràmica	Conducció	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$
$R_{ct,1}$	Resistència contacte ceràmica - TEM		$^{\circ}\text{C}/\text{W}$
R_{TEM}	Resistència tèrmica mòdul TEM	Conducció	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$
$R_{ct,2}$	Resistència contacte TEM - dissipador		$^{\circ}\text{C}/\text{W}$
$R_{hs,cd}$	Resistència tèrmica per conducció entre la base del dissipador i la base de les aletes	Conducció	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$
$R_{hs,cv}$	Resistència tèrmica per convecció a l'ambient pel dissipador	Convecció	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$

En la figura 18 es mostren els elements que constitueixen el model de resistències tèrmiques.

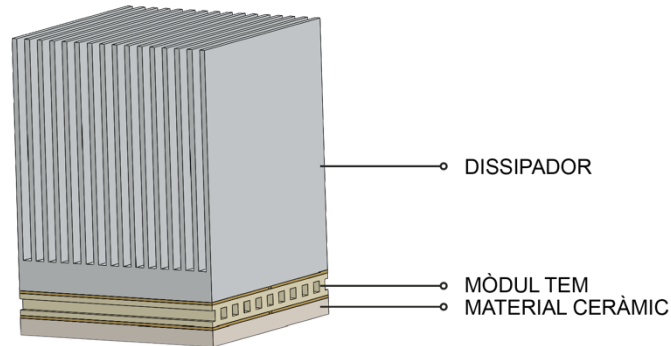


Figura 18. Conjunt TEM + Dissipador.

D'acord amb el model tèrmic anterior, i tenint en compte vàries equacions prèvies (es detallen a l'Annex B. Càlculs) s'arriba a obtenir la següent expressió per calcular el flux de calor a la base de la ceràmica Q_i .

$$Q_i = \frac{T_{cer,h} - T_{amb}}{R_{cer} + R_{ct,1} + R_{TEM} + R_{ct,2} + R_{hs,cd} + R_{hs,cv}} \quad (11)$$

A partir d'aquesta equació general, s'han d'obtenir aquells termes que es troben a la dreta de l'equació (11). Tots són coneguts o es poden calcular.

Variables conegudes:

- $T_{cer,h}$ = Temperatura cara calenta de la ceràmica.
- T_{amb} = Temperatura ambient.
- $R_{ct,1}$; $R_{ct,2}$ = Resistències tèrmiques de contacte 1 i 2.

Dades calculades:

- R_{cer} : Resistència tèrmica de la ceràmica.
- R_{TEM} : Resistència tèrmica del TEM.
- $R_{hs,cd}$: Resistència tèrmica per conducció entre la base del dissipació i la base de les aletes.
- $R_{hs,cv}$: Resistència tèrmica per convecció a l'ambient pel dissipador.

El desenvolupament de les equacions així com el desenvolupament de les variables calculades i la resolució dels coeficients que hi apareixen es detalla a l'Annex B. Càlculs.

Un cop deduït el flux de calor Q_i , es poden detallar els valors de totes les resistències que integren el muntatge.

A partir d'aquí, es poden deduir les temperatures teòriques de la cara calenta i la cara freda del TEM.

Coneixent les temperatures anteriors es pot calcular, per un cas teòric, quin serà el valor de potència màxima [W] produïda pel TEM.

$$P_{TEM} = \alpha^2 n_p^2 \frac{(T_{TEM,h} - T_{TEM,c})^2}{4R} \quad (12)$$

- $T_{TEM,h}$ = Temperatura a la cara calenta del TEM.
- $T_{TEM,c}$ = Temperatura a la cara freda del TEM.
- α = Coeficient Seebeck.
- n_p = N° de pellets a l'interior del TEM.
- R = Resistència interna del TEM [Ω].

Mitjançant l'equació (12) s'obtenen diferents valors de potència màxima generada pel TEM.

Per obtenir la corba de potència neta s'ha de definir quant val la potència que el ventilador necessita per generar el flux d'aire.

La potència del ventilador necessària per fer circular l'aire al pas del dissipador es pot calcular a partir de:

$$P_a = \dot{V} \Delta p \quad (13)$$

On:

- P_a = Potència necessària per fer circular l'aire al pas del dissipador [W].
- \dot{V} = Cabal d'aire al pas del dissipador [m^3/s].
- Δp = Caiguda de pressió al dissipador [Pa].

El cabal d'aire al pas del dissipador és funció de la velocitat mitjana del fluid v , que és un valor conegut que varia en cada cas estudiat (diferents voltatges aplicats al ventilador).

La caiguda de pressió al dissipador es pot calcular analíticament a partir de la fórmula extreta de l'estudi Lindstedt i Karvinen (Lindstedt et al., 2012).

El desenvolupament de les equacions així com la resolució de les diferents variables calculades i els coeficients que hi apareixen es detalla a l'Annex B. Càlculs.

Finalment, es conclou amb l'equació final de potència neta disponible del sistema, definida com:

$$P_{net} = P_{TEM} - P_{fluid} \quad (14)$$

5. RESULTATS DEL MODEL

Obtinguts els resultats a partir dels dos mètodes estudiats (teòric i experimental) es procedeix a fer-ne una comparació entre sí amb la finalitat de donar validesa al mètode analític plantejat.

5.1 VALIDACIÓ

En aquest punt es comparen els resultats obtinguts per a cada dissipador.

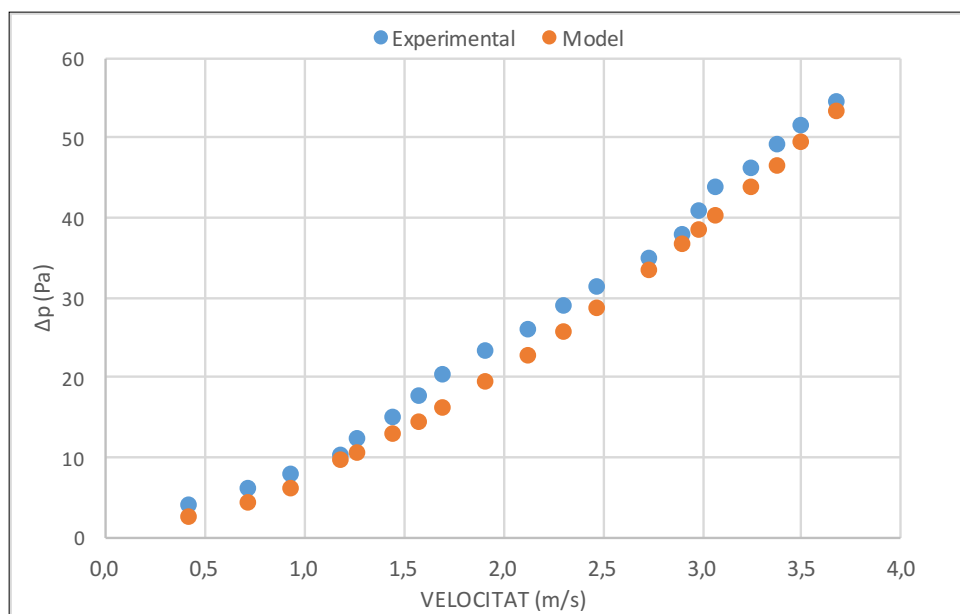


Figura 19. Primer dissipador: Variació de pressió al pas pel dissipador – Velocitat.

En la figura 19, que fa referència al primer dissipador, s'observa que quant més gran és la velocitat en el conducte, la pèrdua de càrrega al pas del dissipador augmenta de forma no-lineal. Aquesta pèrdua de càrrega hauria de ser gairebé proporcional al quadrat de la velocitat d'acord amb l'equació de Darcy-Weisbach si el flux fos turbulent i gairebé lineal (comportament no observat) si el flux fos laminar.

Es comprova la relació entre els dos conjunts de dades i s'observa que, a banda de les primeres lectures que tenen una diferència del 42% entre sí, la resta de dades s'estabilitza a mesura que avança l'assaig. La tendència que prediu el model s'ajusta molt bé a l'obtinguda experimentalment.

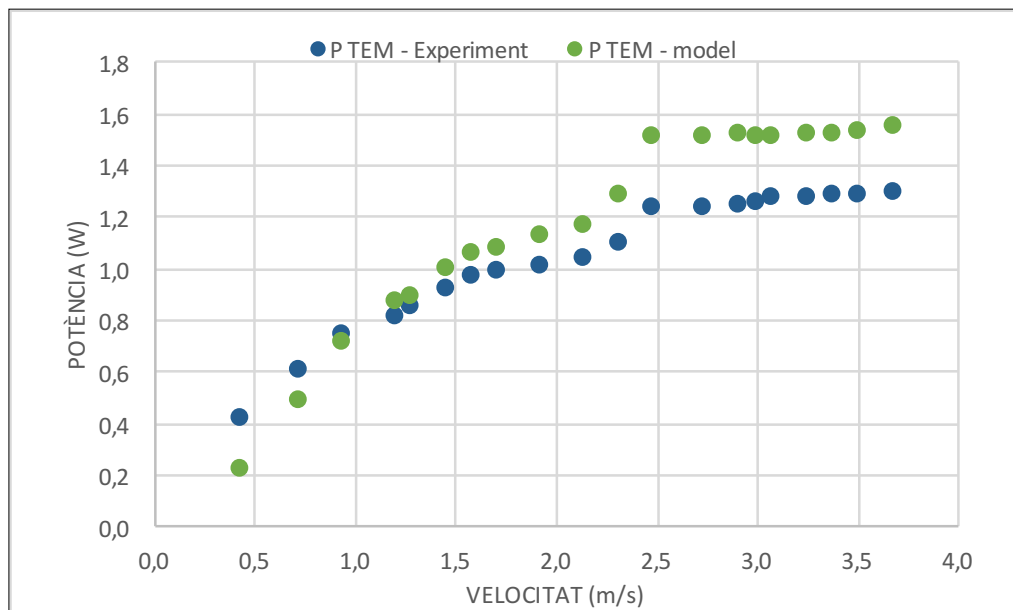


Figura 20. Primer dissipador: Potència màxima – Velocitat.

En la figura 20 es representa el valor de potència màxima generada pel TEM en funció de la velocitat del ventilador. Una velocitat elevada provoca una millora en la refrigeració de la cara freda del TEM, la qual cosa es tradueix en més potència generada. Es comprova la relació entre els dos conjunts de dades i s'observa que, a banda de les primeres lectures que tenen una diferència del 47% entre sí, la resta de dades del model tenen un comportament similar a l'experimental.

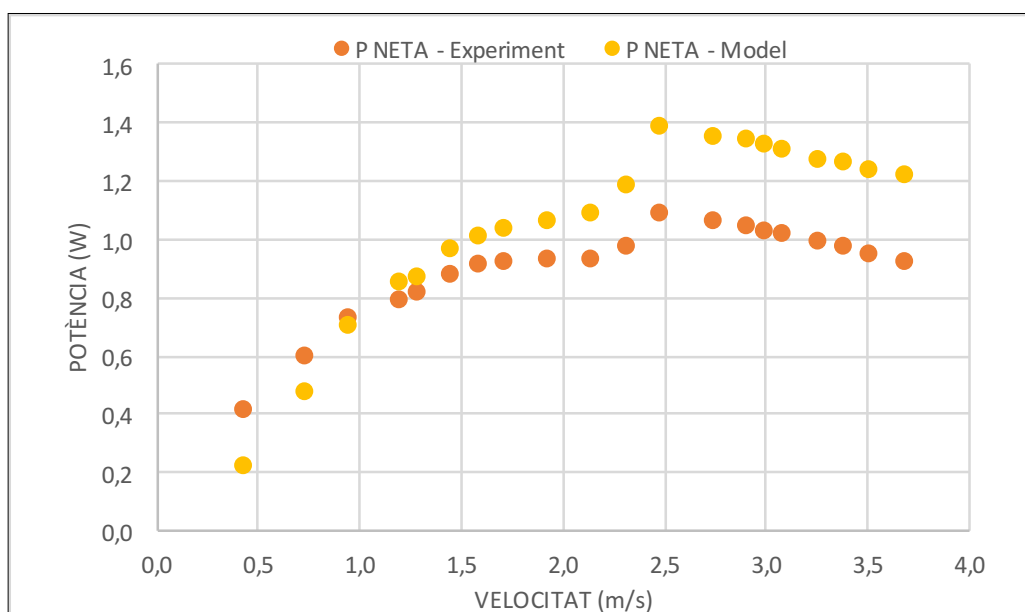


Figura 21. Primer dissipador: Potència neta – Velocitat.

En la figura 21 es representa el valor de potència neta màxima (tenint en compte el consum per generar el flux d'aire) generada pel TEM en funció de la velocitat del ventilador. Es comprova la relació entre els dos conjunts de dades (model i experimental) i s'observa que, a banda de les primeres lectures que tenen una diferència del 48% entre sí, el model prediu correctament la tendència i, especialment, el punt de màxima potència neta mesurada.

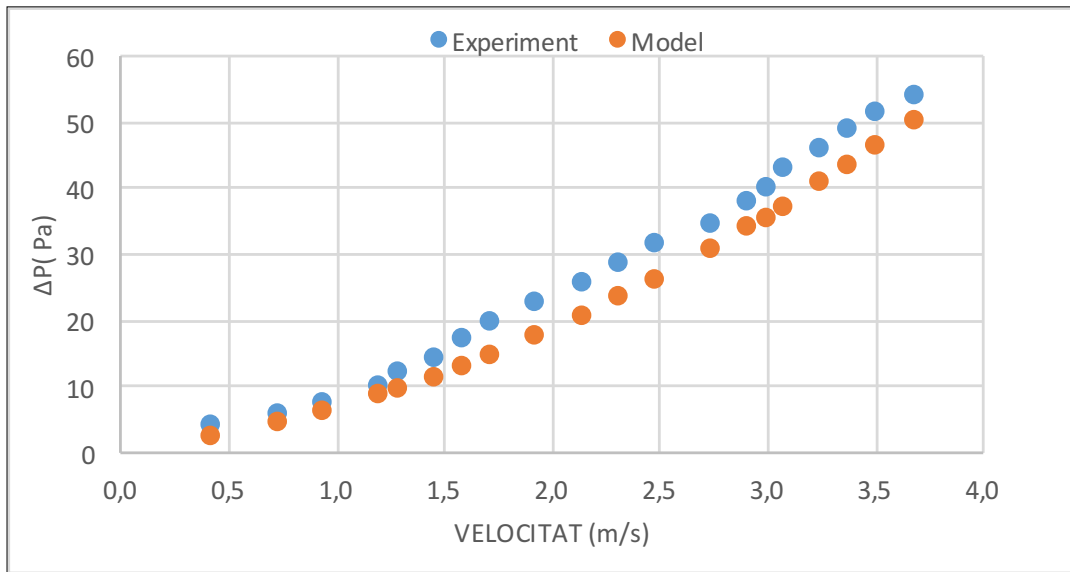


Figura 22. Segon dissipador: Variació de pressió al pas pel dissipador – Velocitat.

En la figura 22, que fa referència al segon dissipador, s'observa que quant més gran és la velocitat en el conducte, la pèrdua de càrrega al pas del dissipador augmenta de forma no-lineal. Aquesta pèrdua de càrrega hauria de ser gairebé proporcional al quadrat de la velocitat d'acord amb l'equació de Darcy-Weisbach si el flux fos turbulent i gairebé lineal (comportament no observat) si el flux fos laminar.

Es comprova la relació entre els dos conjunts de dades (model i experiment). En aquest cas, el comportament també és molt semblant, només amb una discrepància elevada al principi (diferència del 49%). Per a la resta de dades, la diferència és menor a mesura que augmenta la velocitat. La tendència que prediu el model s'ajusta molt bé a l'obtinguda experimentalment.

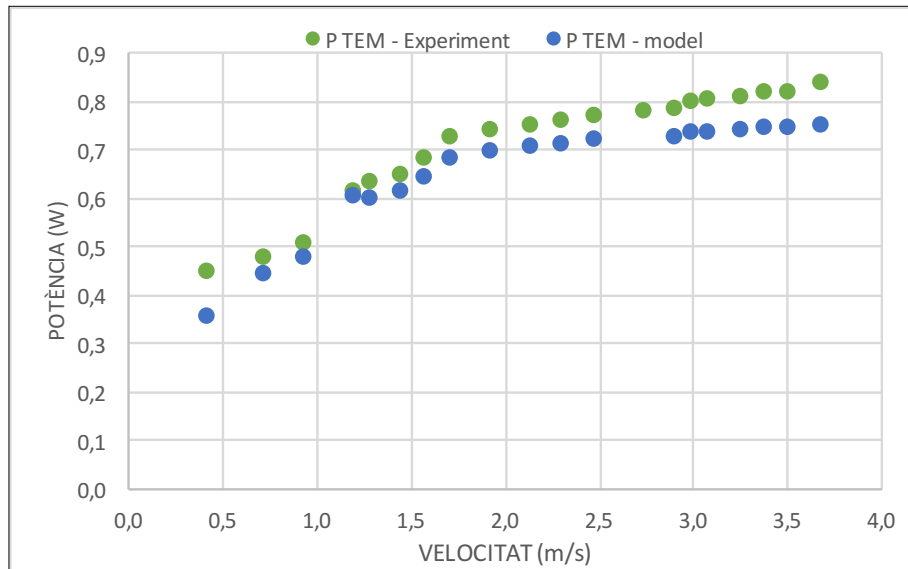


Figura 23. Segon dissipador: Potència màxima – Velocitat.

En la figura 23 es representa el valor de potència màxima generada pel TEM en funció de la velocitat del ventilador. Una velocitat elevada provoca una millora en la refrigeració de la cara freda del TEM, la qual cosa es tradueix en més potència generada.

Pel que respecte al segon dissipador, la potència que prediu el model per a les mateixes condicions de velocitat que les experimentals és molt semblant a l'observada. La diferència màxima és del 20,53% al principi, reduint-se considerablement per als altres valors de velocitat d'assaig.

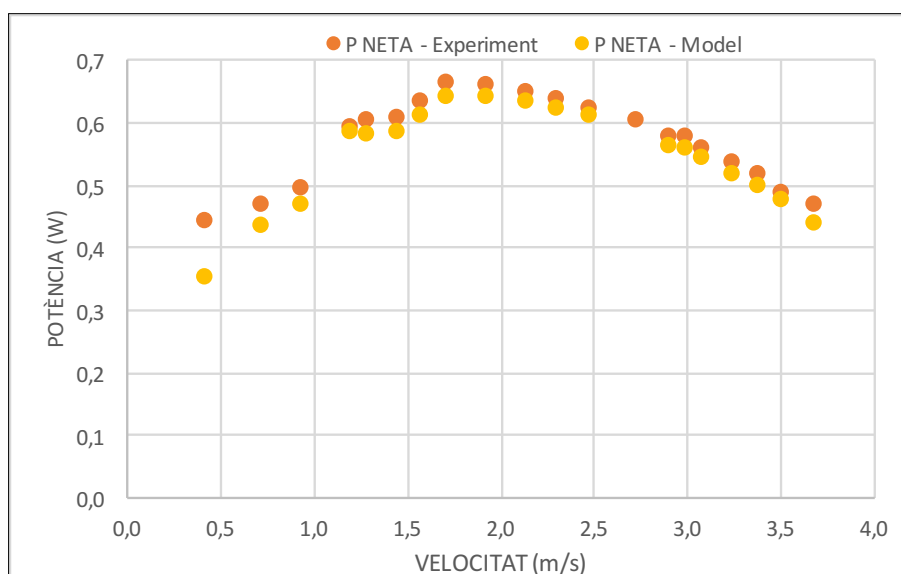


Figura 24. Segon dissipador: Potència neta – Velocitat.

En la figura 24 es representa el valor de potència neta màxima (tenint en compte el consum per generar el flux d'aire) generada pel TEM en funció de la velocitat del ventilador. Es comprova la relació entre els dos conjunts de dades (model i experimental) i s'observa que, a banda de les primeres lectures que tenen una diferència del 20,32% entre sí, el model prediu correctament la tendència i, especialment, el punt de màxima potència neta mesurada.

Després de comprovar l'existència d'una relació entre els resultats teòrics i els experimentals, s'accepta el model analític plantejat.

5.2 ALTRES CASOS

A partir del model teòric generat i de la seva prèvia validació, es poden deduir els diferents comportaments que tindrien dissipadors amb altres característiques.

Per tal de ser fidels al cas estudiat, es proposen una sèrie de casos alternatius als dos estudiats on únicament es variaran dos paràmetres de les dimensions del dissipador:

- Espessor de les aletes.
- Número d'aletes.

D'aquesta manera s'assegura una anàlisi que sempre està en les mateixes condicions de treball i en la que els resultats obtinguts dependran únicament del dissipador que s'utilitzi.

S'han introduït diferents casos al model teòric i es presenten els resultats a la taula 10.

Taula 10. Resultats teòrics per a altres tipus de dissipador.

t	N	P _{vent}	P _{TEMmax}	P _{netamax}	VEL _{pmax}
mm	-	W	W	W	m/s
1	12	0,12	0,8	0,68	3
1	10	0,11	0,6	0,49	3,3
1	8	0,1	0,42	0,32	3,6
1	6	0,08	0,26	0,18	3,6
1	4	0,05	0,13	0,08	3,9
2	12	0,333	1,2	0,87	2,7
2	10	0,12	0,75	0,63	2,4
2	8	0,12	0,51	0,39	3
2	6	0,06	0,28	0,22	3
2	4	0,06	0,15	0,09	3,6

On:

- t [mm]: Gruix de les aletes del dissipador.
- N: N° d'aletes del dissipador.
- P_{TEMmax} [W]: Potència màxima generada pel TEM.
- P_{netamax} [W]: Potència neta màxima obtinguda tenint en compte la P_{TEMmax} i el consum del ventilador.
- VEL_{pmax} [m/s]: Velocitat del flux d'aire en el punt de màxima potència neta.

Com es pot comprovar a la taula, s'han plantejat un seguit de casos teòrics per estudiar quin és el comportament del dissipador.

S'han separat els casos en funció del gruix de les aletes del dissipador i, dins cada un dels dos subgrups, s'han assignat diferents quantitats d'aletes per veure quina és la resposta obtinguda.

Es calcula la relació entre la $P_{netamax}$ i la P_{TEMmax} per a cada un dels diferents casos com a:

$$\eta (\%) = \frac{P_{netamax}}{P_{TEMmax}} \cdot 100 \quad (15)$$

Per $t = 1 \text{ mm}$:

- Es comprova la relació per a cada número diferent d'aletes i es conclou que el cas més eficient és per $N = 12$ amb un rendiment $\eta = 85,00 \%$.

Un número més elevat d'aletes ofereix una major superfície de contacte amb l'aire que travessa, és a dir, una major dissipació de calor.

Per $t = 2 \text{ mm}$:

- Es comproven els rendiments per a cada número diferent d'aletes i es conclou que el cas més eficient és per $N = 10$ amb un rendiment $\eta = 84,00 \%$.

És remarcable que a causa d'un augment del gruix "t" d'aleta respecte el cas anterior, no és tan important disposar d'un major nombre d'aletes "N" per aconseguir la màxima eficiència. Com s'ha comentat anteriorment, un nombre gran d'aletes aporta una millor dissipació de calor a causa d'oferir una superfície de contacte més gran però, al mateix temps, produeix que hi hagi un augment de la resistència al pas d'aire (caiguda de pressió) que acaba causant un major consum del ventilador per moure un flux d'aire igual.

6. CONCLUSIONS

- S'ha definit una metodologia per obtenir experimentalment el punt de disseny d'un mòdul de generació termoelèctrica amb dissipació per convecció forçada.
- Aquest punt de disseny correspon a les condicions de flux d'aire incident que, fixada la temperatura al focus calent, dona una potència neta màxima del sistema (potència generada pel termoelèctric menys la potència necessària per moure l'aire a través del dissipador).
- Per al model d'assaig, i en les condicions de temperatura al focus calent fixades, les condicions del punt de disseny per als dos dissipadors analitzats són d'una potència neta màxima produïda de 1,09 [W] per a una velocitat de flux d'aire de 2,48 [m/s] amb una relació d'eficiència respecte la potència màxima produïda pel TEM del 89% i d'una potència neta màxima produïda de 0,66 [W] per a una velocitat de flux d'aire de 1,71 [m/s] amb una relació d'eficiència respecte la potència màxima produïda pel TEM del 91%.
- S'ha desenvolupat un model analític que reproduïx correctament el comportament experimental.
- Aquest model analític permet obtenir el punt de disseny i es pot utilitzar com a regla de càlcul per al disseny de dissipadors en mòduls termoelèctrics que treballin en convecció forçada.

7. RELACIÓ DE DOCUMENTS

El present document consta dels següents documents:

DOCUMENT N° 1. MEMÒRIA

MEMÒRIA DESCRIPTIVA

ANNEX A. FITXES TÈCNIQUES

ANNEX B. CÀLCULS

DOCUMENT N° 2. PRESSUPOST

8. BIBLIOGRAFIA

Es detalla la bibliografia utilitzada durant el desenvolupament del treball.

LINDSTEDT, M., KARVINEN, R. Optimization of Plate Fin Arrays with Laminar and Turbulent Forced Convection. Journal of Physics. Setembre 2012.

RUIZ, I., BORRELLI, M., PUJOL, T., LUO, N., PACHECO, L., MASSAGUER, A., MONTORO, L. Effective thermal conductance of thermoelectric generator modules. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ). Màlaga 2017.

T'JOLLYN, I., PUJOL, T., DE PAEPE, M., MASSAGUER, A., MONTORO, L. Plate fin heat sink modelling and design considerations for thermoelectric generators. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ). Màlaga 2017.

ANNEX A. FITXES TÈCNIQUES

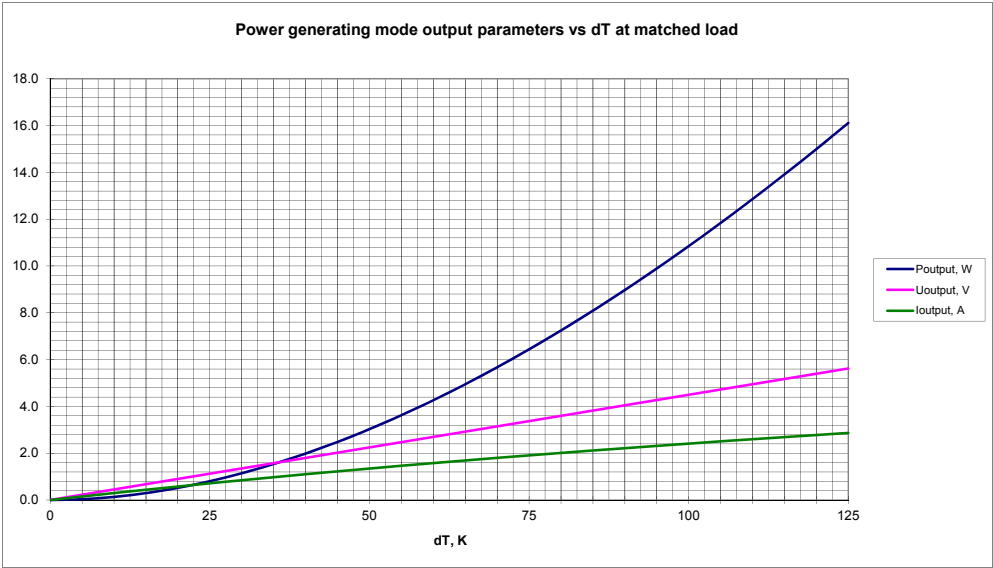
Es detallaran les diferents fitxes tècniques dels aparells utilitzats durant el desenvolupament del treball.

A.1 MÒDUL TERMOELÈCTRIC

S'adjunten les característiques facilitades pel fabricant del TEM utilitzat:

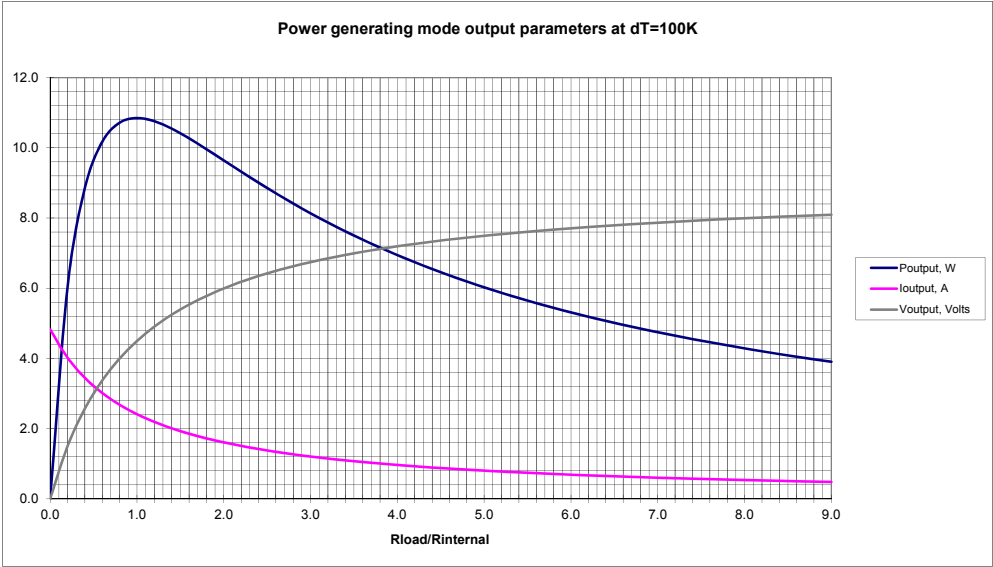
[illegible]

Crystal LTD
H-199-14-06-L2
power generating mode



Page 2 from 3

Crystal LTD
H-199-14-06-L2
power generating mode



Page 3 from 3

A.2 PLACA CALEFACTORA

S'adjunten les característiques facilitades pel fabricant de la placa calefactora utilitzada:



Placas rectangulares "Combiplac"

PARA TEMPERATURAS REGULABLES SOBRE PLACA HASTA 400 °C.

CARACTERÍSTICAS

Regulación electrónica de energía de calefacción.
Placa calefactora en acero indeformable con los elementos calefactores circundantes en toda su superficie.
Mueble superior en acero inox. AISI 304.

PANEL DE MANDOS

Interruptor general con indicador luminoso (POWER).
Regulador electrónico de energía del calefactor entre 0 - 100%.
Lámpara de señalización de funcionamiento del calefactor.
Conexión posterior que permite acoplar termómetro de contacto electrónico "Sensoterm" o regulador electrónico digital "Electemp-TFT" que describimos como accesorios. Ver capítulo Regulación y Control (págs. 348 y 349).

MODELOS

Código	Ancho / Fondo (util placa) cm	Alto / Ancho / Fondo (exterior) cm	Consumo W	Peso Kg
3000156	20 40	12 22 55	2300	9
3000718	30 30	13 33 46	2800	13



ACCESORIOS

Adaptadores para baños de arena. Cubeta construida en acero inox. AISI 304 indeformable, de quita y pon para su fácil limpieza.

Código	Para la placa código	Alto/Ancho/Fondo (util cubeta) cm
6000719	3000156	5,5 20 40
6000720	3000718	5,5 31 31



Placas circulares "Combiplac"

PARA TEMPERATURAS REGULABLES SOBRE PLACA HASTA 400 °C.

CARACTERÍSTICAS

Regulación electrónica de energía de calefacción.
Placa calefactora en acero indeformable con los elementos calefactores circundantes en toda su superficie.
Orificio lateral que permite acoplar barra soporte.
Mueble superior en acero inox. AISI 304.

PANEL DE MANDOS

Interruptor general con indicador luminoso (POWER).
Regulador electrónico de energía del calefactor entre 0 - 100%.
Lámpara de señalización de funcionamiento del calefactor.
Conexión posterior que permite acoplar termómetro de contacto electrónico "Sensoterm" o regulador electrónico digital "Electemp-TFT" que describimos como accesorios. Ver Regulación y Control (págs. 361 a 363).



MODELOS

Código	Ø placa cm	Alto / Ancho / Fondo (exterior) cm	Consumo W	Peso Kg
3002301	12	10 16 27	550	2
3002302	19	13 21 30	950	3

COMPLEMENTOS

Solamente para la placa de 12 cm Ø. Código 3002301:

Recipiente en acero inox. AISI 304 adaptable de 140 Ø y 75 mm alto, con discos reductores. Útil para baño María, de aceite o de arena.
Código **7002510**

Adaptador en aluminio para matraces Kjeldahl de 50 a 100 ml y de fondo redondo de 50 a 100 ml.
Código **1002290**

Adaptador en aluminio para matraces Kjeldahl de 300 a 800 ml y de fondo redondo y Soxhlet de 250 a 500 ml.
Código **1002280**

Barra soporte de 12 Ø y 500 mm alto, adaptable al mueble. Para placas código 3002301 y 3002302.
Código **1000725**



Termómetro de contacto electrónico

con lectura digital "Sensoterm".
Con sonda de medida Pt 100 con funda en acero inox. AISI 304.
Código **1001009**
Características y Accesorios. Ver Regulación y Control (págs. 361 a 363).



Regulador electrónico de temperatura "Electemp-TFT"

Código	Alto / Ancho / Fondo (exterior) cm	Carga máx. (a 230 V) W	Peso Kg
3000897	10,5 13,5 21	3100	1,250

Características y Accesorios. Ver Regulación y Control (págs. 361 a 363).



A.3 REGULADOR ELECTRÒNIC

S'adjunten les característiques facilitades pel fabricant del regulador utilitzat per controlar la placa calefactora:

Aparatos para regulación y control



Regulador electrónico "Electemp-TFT"



NUEVO
DISEÑO

CARACTERÍSTICAS

Rango de temperatura desde -150 °C hasta 1300 °C.
Estabilidad: $\pm 0,1$ °C.
Resolución: $\pm 0,1$ °C Pt 100 / ± 1 °C sonda tipo K.
Aparato con pantalla táctil TFT de 4,3 pulgadas:
Interruptor general.
Alarma acústica visual.
Reloj calendario.
Programación conexión/desconexión simple o cíclica.
Hasta 10 programas de trabajo.
Hasta 6 segmentos por cada programa.
Tiempo de estabilidad en cada segmento (de 1 min a 99h).
Rampas de subida entre segmentos.
Memorización de alarmas e incidencias.
Detección de error de sonda.
Autodiagnóstico.
Detección y memorización de fallos de red (fecha, hora inicio y fin).
Alarmas de sobre temperatura, temperatura baja y su memorización (fecha hora inicio, fin y temperatura).
Termostato de seguridad (TS) por software.
Salida USB.
Salida RS-232.
Software para PC.
Manual de usuario resumido en pantalla.
Autotuning del control de temperatura.
Parámetros configurables: Fecha/hora, corrección de temperatura, intervalo de recogida de datos, idioma (inglés, castellano y francés), selección °C/°F, límite de sobre temperatura y baja temperatura.

PANEL DE MANDOS

Indicador de temperatura de consigna y tiempo.
Indicador de límite de temperatura.
Pulsador virtual para temporizador.
Pulsador virtual retroceso.
Pulsador virtual de marcha.
Pulsador virtual de paro.
Pulsador virtual de programación.

PARTE POSTERIOR

Salida de potencia (Base de enchufe Schuko) 3100 W, 230 V.
Fusible de protección.
Conector sonda Pt 100.
Conector sonda termopar tipo K.
Conector salida de señal para aparatos con entrada de termómetro de contacto eléctrico.

APLICACIONES

Como termómetro lector.
Como regulador y lector de la temperatura para cualquier aparato en que el sistema de control es regulado por termómetro de contacto eléctrico sustituyendo a éste, como pueden ser: Baños termostáticos, Termostatos de inmersión, Placas y Agitadores con calefacción, etc.
Como termostato de inmersión por medio de un calefactor de potencia máxima de 3100 W.
Como regulador y lector de temperatura en diferentes aparatos  con el distintivo. 



MODELO

Código	Alto / Ancho / Fondo cm (exterior)	Carga máx. W (a 230 V)	Peso Kg
3000897	10,5 13,5 21	3100	1,250


ACCESORIOS



Sonda Pt 100. Medidas inmersión: 4 mm Ø, 130 mm largo. Cable conector: 150 cm largo.
Código **1000893**
Sonda tipo K. Medidas inmersión: 2 mm Ø, 150 mm largo. Cable conector: 150 cm largo.
Código **1000895**

A.4 VENTILADOR

S'adjunten les característiques facilitades pel fabricant del ventilador utilitzat:

Fans



Two Speed "Turbo" Fans

Internationally respected Hella Turbo fans may be turned and pivoted in all directions and locked into position.

- Quality German motor for quiet operation
- 150mm diameter fan blade with guard
- High air moving capacity with low power consumption
- Two speed switch in front of the blade guard
- Side, upright or pendant mounting

Material Description Impact resistant plastic

Switch Integrated 2 stage rotary


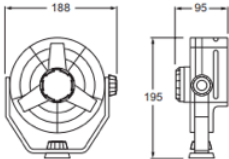
Output Speed 1: 70 litre / sec.
Speed 2: 95 litre / sec.

Power Consumption 6.5W

Installation Pre-wired with 1.4m / 4.6ft of cable


Two Speed Fan "Turbo"

Voltage	Housing Colour	Part Number
12V	Black Housing	8EV 003 361-002
12V	White Housing	8EV 003 361-022
24V	Black Housing	8EV 003 361-012

A.5 MATERIAL CERÀMIC MACOR

S'adjunten les característiques facilitades pel fabricant del material ceràmic utilitzat:



A unique material

MACOR[®] Machinable Glass Ceramic

MACOR[®] machinable glass ceramic is recognized worldwide to be a major technological innovation, as well as a technical solution for a wide range of industrial applications.

Opening a wide range of possibilities MACOR[®] gives the performance of a technical ceramic with the versatility of a high performance polymer, while providing the machinability of a soft metal.

As a result, MACOR[®] is an outstanding engineering material which can quickly be designed into highly complex shapes, using conventional metalworking tools.

Engineered to perfection

MACOR[®] can be considered unique as its composition comprises 55% fluorophlogopite mica and 45% borosilicate glass. Corning's unique production process results in Macor's microstructure that is a key to its versatile properties.

General properties

MACOR[®] offers a unique combination of properties, unlike any other technical material.

It is a white, nonwetting, odorless and non outgassing material that exhibits zero porosity.

Extremely machinable, MACOR[®] offers tight tolerances capabilities, allowing complicated shape design (optimal performances up to +/- 0.013 mm for dimensions, < 0.5 µm for finished surface and up to 0.013 µm for polished surface).

MACOR[®] remains continuously stable at 800 °C, with a maximum peak at 1000 °C under no load, and unlike ductile materials, doesn't creep or deform.

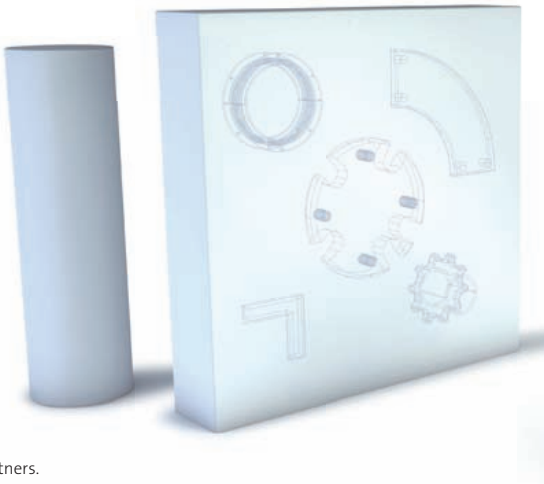
Its coefficient of thermal expansion readily matches most metals and sealing glasses.

As an electric insulator, particularly at high temperatures, it is excellent at high voltages and a broad spectrum of frequencies.

Material Forms

Corning supplies MACOR[®] as slab and rod.

High precision finished parts are manufactured by our specialist partners.



Key Benefits

Product

- Easily machinable
- Withstands high temperatures
- Low thermal conductivity
- Holds tight tolerances
- Electrical insulator
- Zero porosity and no outgassing
- Strong & rigid
- Highly polishable
- can be soldered to a wide range of material
- Radiation resistant
- Lead free

Process

Short production process



- Ordinary machining tools
- Complex design shapes
- No post firing required
- Fast turnaround and cost effective
- Quick end-user delivery time

Unrivalled properties combination - A wide range of possibilities
Quickly - Accurately - Economically

Industry Applications

MACOR® builds value in every field :

- Constant and ultra-high vacuum environments
- Laser technology
- Semiconductor / Electronic
- Aerospace / Space
- Medical/ Laboratory equipment
- Fixtures
- Chemical
- Automobile
- Military
- Nuclear...

Properties

I. Thermal

	SI/Metric	Imperial
Coefficient of Expansion		
CTE -100°C → 25°C	81 x 10 ⁻⁷ /°C	45 x 10 ⁻⁷ /°F
CTE 25°C → 300°C	90 x 10 ⁻⁷ /°C	50 x 10 ⁻⁷ /°F
CTE 25°C → 600°C	112 x 10 ⁻⁷ /°C	62 x 10 ⁻⁷ /°F
CTE 25°C → 800°C	123 x 10 ⁻⁷ /°C	68 x 10 ⁻⁷ /°F
Specific Heat, 25°C	0,79 kJ/kg°C	0.19 Btu/lb°F
Thermal Conductivity, 25°C	1,46 W/m°C	10.16 Btu.in/hr.ft²°F
Thermal Diffusivity, 25°C	7,3 x 10 ⁻⁷ m²/s	0.028 ft²/hr
Continuous Operating Temperature	800°C	1472°F
Maximum No Load Temperature	1000°C	1832°F

II. Mechanical

	SI/Metric	Imperial
Density	2,52 g/cm³	157 lbs/ft³
Porosity	0%	0%
Young's Modulus, 25°C (Modulus of Elasticity)	66,9 GPa	9.7 x 10 ⁶ PSI
Poisson's Ratio	0,29	0.29
Shear Modulus, 25°C	25,5 GPa	3.7 x 10 ⁶ PSI
Knoop Hardness, 100g	250 kg/mm²	
Modulus of Rupture, 25°C (Flexural Strength)	94 MPa (Minimum specified average value)	13 600 PSI
Compressive Strength (After polishing)	345 MPa up to 900 MPa	49 900 PSI 130 000 PSI

III. Electrical

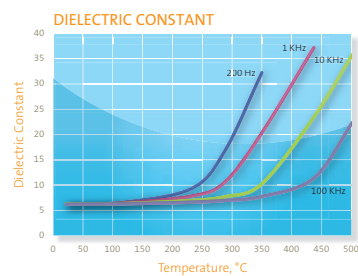
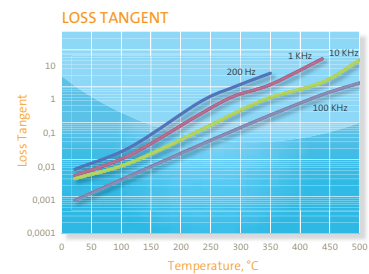
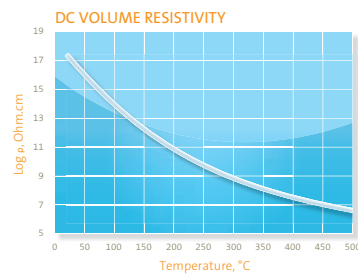
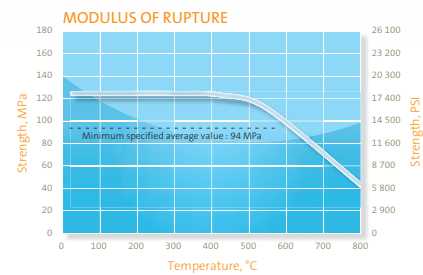
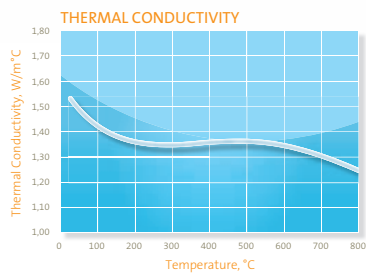
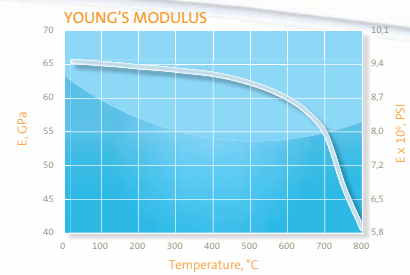
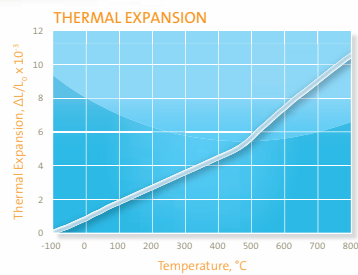
	SI/Metric	Imperial
Dielectric Constant, 25°C		
1 kHz	6,01	6.01
8,5 GHz	5,64	5.64
Loss Tangent, 25°C		
1 kHz	0,0040	0.0040
8,5 GHz	0,0025	0.0025
Dielectric Strength (AC) avg. 25°C, under 0,03 mm thickness.	45 kV/mm	1143 V/mil
Dielectric Strength (DC) avg. 25°C, under 0,03 mm thickness	129 kV/mm	3277 V/mil
DC Volume Resistivity, 25°C	10 ¹⁷ Ohm.cm	10 ¹⁷ Ohm.cm

IV. Chemical

Solution	pH	Time	Temp.	Weight Loss (mg/cm²) Gravimetric
5% HCl (Hydrochloric Acid)	0,1	24 hrs	95°C	~100
0,002 N HNO ₃ (Nitric Acid)	2,8	24 hrs	95°C	~0,6
0,1 N NaHCO ₃ (Sodium Bicarbonate)	8,4	24 hrs	95°C	~0,3
0,02 N Na ₂ CO ₃ (Sodium Carbonate)	10,9	6 hrs	95°C	~0,1
5% NaOH (Sodium Hydroxide)	13,2	6 hrs	95°C	~10

Chemical durability		Class
DIN 12111 / NF ISO 719	Water	HGB2
DIN 12116	Acid	4
DIN 52322 / ISO 695	Alkali	A3

Technical Data



Actual properties of specific production batches may vary.
Stated general properties reflect results from regular tests on sample quantities in Corning labs.

A.6 SENSOR DE PRESSIÓ

S'adjunten les característiques facilitades pel fabricant del sensor de pressió (SDP 600 – 125 Pa) utilitzat juntament amb el Kit d'avaluació de dades:

SENSIRION
THE SENSOR COMPANY

SDP600 Series (SDP6xx/5xx)

Low-cost Digital Differential Pressure Sensor

- Accuracy better than 0.2% FS near zero
- Digital output (I²C)
- Excellent repeatability, even below 10 Pa
- Calibrated and temperature compensated
- Excellent long-term stability
- Flow measurement in bypass configuration



Product Summary

The SDP600 sensor family is Sensirion's series of digital differential pressure sensors designed for high-volume applications. They measure the pressure of **air and non-aggressive gases** with superb accuracy and no offset drift. The sensors cover a **pressure range of up to ±500 Pa** (±2 inch H₂O / ±5 mbar) and deliver **outstanding accuracy** even at the bottom end of the measuring range.

The SDP600 series operates from a 3.3V supply voltage and features a digital 2-wire interface, which makes it easy to connect directly to a microprocessor. The signal is internally **linearized** and **temperature compensated**.

The outstanding performance of these sensors is based on Sensirion's **patented CMOSens® sensor technology**, which combines the sensor element, signal processing and digital calibration on a tiny microchip. The differential pressure is measured by a thermal sensor element using flow-through technology. Compared with membrane-based sensors, the SDP600 features an **extended dynamic range**, better **long-term stability**, and improved repeatability, especially near zero.

The well-proven CMOS technology is perfectly suited for high-quality mass production and is the ideal choice **for demanding and cost-sensitive OEM applications**.

Applications

- Medical
- HVAC
- Automotive
- Process automation
- Burner control

Sensor chip

The SDP600 series features a fourth-generation silicon sensor chip called SF04. In addition to a thermal mass flow sensor element, the chip contains an amplifier, A/D converter, EEPROM memory, digital signal processing circuitry, and interface. The highly sensitive chip requires only a minuscule amount of gas flow through the sensor.

OEM options

A variety of custom options can be implemented for high-volume OEM applications. Ask us for more information.



1. Sensor Performance

1.1 Physical specifications¹

Parameter	SDP600-500Pa SDP610-500Pa	SDP600-125Pa SDP610-125Pa	SDP600-25Pa SDP610-25Pa	SDP601 SDP611	SDP500 SDP510	SDP501 SDP511
Short Description	Standard	Low DP	Lowest DP	"Mass Flow"	Low cost	Low cost "Mass Flow"
Calibrated range ²	- 500 Pa to + 500 Pa (± 2.0 in. H ₂ O)	- 125 Pa to + 125 Pa (± 0.5 in. H ₂ O)	- 25 Pa to + 25 Pa (± 0.1 in. H ₂ O)	- 500 to + 500 Pa (± 2.0 in. H ₂ O)	0 Pa to +500 Pa (0 to 2.0 in. H ₂ O)	
Temperature- compensation	yes	yes	yes	mass flow ³	yes	mass flow ³
Resolution	12 bits preset ⁴ (adjustable from 9 to 16 bit)					
Zero point accuracy ^{5,6}	0.2 Pa	0.1 Pa		0.2 Pa		
Span accuracy ^{5,6}	3% of reading				4.5% of reading	
Zero point repeatability ^{5,6}	0.1 Pa	0.05 Pa	0.03 Pa	0.1 Pa		
Span repeatability ^{5,6}	0.5% of reading					
Offset shift due to temperature variation	None (less than resolution)					
Span shift due to temperature variation	< 0.5% of reading per 10°C					
Offset stability	< 0.1 Pa/year					
Response time ⁴	4.6 ms typical at 12-bit resolution					
Warm-up time for first reliable measurement	Typ. 50 ms (first measurement typically after 16 ms)					

¹ Unless otherwise noted, all sensor specifications are valid at 25°C with Vdd = 3.3 V and absolute pressure = 966 mbar.

² The SDP50x/SDP51x sensors can detect negative differential pressures in the range of -500 to 0Pa. A negative differential pressure is represented by a negative value. The accuracy of the negative differential pressure is not specified and might have significant inter-sensor variation.

³ Please see chapter 5.3 for details.

⁴ See Application Note for response times with other resolutions, e.g. 1.3 ms with 10 bits.

⁵ With 12-bit resolution; includes repeatability and hysteresis.

⁶ Total accuracy/repeatability is a sum of zero-point and span accuracy/repeatability.



1.2 Ambient conditions

Parameter	SDP5xx / SDP6xx Series
Calibrated for ⁷	Air, N ₂
Media compatibility	Air, N ₂ , O ₂
Calibrated temperature range	-20 °C to +80 °C
Operating temperature	-20 °C to +80 °C
Storage temperature ⁷	-40 °C to +80 °C
Position sensitivity	Less than repeatability error

1.3 Materials

Parameter	SDP5xx / SDP6xx Series
Wetted materials	PBT (polybutylene terephthalate), glass (silicon nitride, silicon oxide), silicon, gold, FR4, silicone as static sealing, epoxy, copper alloy, lead-free solder
REACH, RoHS	REACH and RoHS compliant

2. Electrical Specifications

Parameter	SDP5xx / SDP6xx
Operating voltage	3.0– 3.6 V (A supply voltage of 3.3 V is recommended)
Current drain	< 6 mA typical in operation
Interface	Digital 2-wire interface (I ² C)
Bus clock frequency	100 kHz typical, 400 kHz max.
Default I ² C address	64 (binary: 1000 000)
Scale factor⁸	
SDP6xx-500Pa & SDP5xx	60 Pa ⁻¹
SDP6x0-125Pa	240 Pa ⁻¹
SDP6x0-25Pa	1200 Pa ⁻¹
Scale factor to alternative units ⁹	For all 500 Pa versions: 6'000 mbar ⁻¹ 413'686 psi ⁻¹ 14'945 (inch H ₂ O) ⁻¹
SDP 6x0-125Pa	24'000 mbar ⁻¹ 1'654'744 psi ⁻¹ 59'780 (inch H ₂ O) ⁻¹
SDP6x0-25Pa	120'000 mbar ⁻¹ 8'273'719 psi ⁻¹ 298'900 (inch H ₂ O) ⁻¹

⁷ Contact Sensirion for information about other gases, wider calibrated temperature ranges and higher storage temperatures.

⁸ See section 5.1. The scale factor may vary with other configurations.

⁹ Instead of the standard scale factor (to get the physical value in Pa), the sensor output may be divided by alternative scale factors to receive the physical value in another unit.



3. Interface Specifications

The serial interface of the SDP600 series is compatible with I²C interfaces. For detailed specifications of the I²C protocol, see *The I²C Bus Specification* (source: NXP).

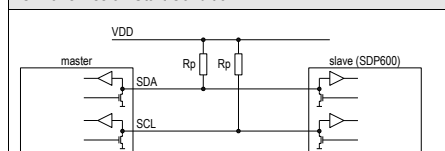
3.1 Interface connection – external components

Bi-directional bus lines are implemented by the devices (master and slave) using open-drain output stages and a pull-up resistor connected to the positive supply voltage.

The recommended pull-up resistor value depends on the system setup (capacitance of the circuit or cable and bus clock frequency). In most cases, 10 kΩ is a reasonable choice.

The capacitive loads on SDA and SCL line have to be the same. It is important to avoid asymmetric capacitive loads.

I²C Transmission Start Condition



Both bus lines, SDA and SCL, are bi-directional and therefore require an external pull-up resistor.

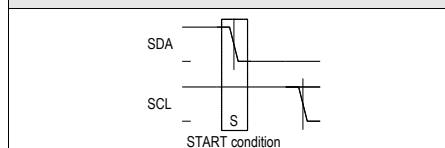
3.2 I²C Address

The I²C address consists of a 7-digit binary value. By default, the I²C address is set to 64 (binary: 1000 000). The address is always followed by a write bit (0) or read bit (1). The default hexadecimal I²C header for read access to the sensor is therefore h81.

3.3 Transfer sequences

Transmission START Condition (S): The START condition is a unique situation on the bus created by the master, indicating to the slaves the beginning of a transmission sequence (the bus is considered busy after a START).

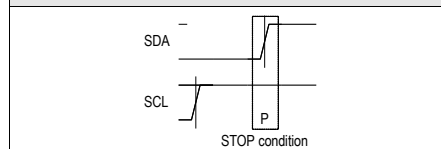
I²C Transmission Start Condition



A HIGH to LOW transition on the SDA line while SCL is HIGH

Transmission STOP Condition (P): The STOP condition is a unique situation on the bus created by the master, indicating to the slaves the end of a transmission sequence (the bus is considered free after a STOP).

I²C Transmission Stop Condition

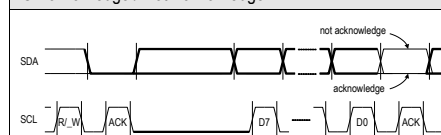


A LOW to HIGH transition on the SDA line while SCL is HIGH.

Acknowledge (ACK) / Not Acknowledge (NACK): Each byte (8 bits) transmitted over the I²C bus is followed by an acknowledge condition from the receiver. This means that after the master pulls SCL low to complete the transmission of the 8th bit, SDA will be pulled low by the receiver during the 9th bit time. If after transmission of the 8th bit the receiver does not pull the SDA line low, this is considered to be a NACK condition.

If an ACK is missing during a slave to master transmission, the slave aborts the transmission and goes into idle mode.

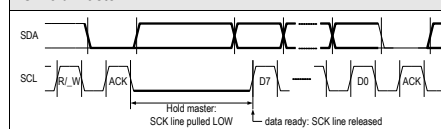
I²C Acknowledge / Not Acknowledge



Each byte is followed by an acknowledge or a not acknowledge, generated by the receiver

Handshake procedure (Hold Master): In a master-slave system, the master dictates when the slaves will receive or transmit data. However, in some situations a slave device may need time to store received data or prepare data to be transmitted. Therefore, a handshake procedure is required to allow the slave to indicate termination of internal processing.

I²C Hold Master



After the SCL pulse for the acknowledge signal, the SDP600 series sensor (slave) can pull down the SCL line to force the master into a wait state. By releasing the SCL line, the sensor indicates that its internal processing is completed and transmission can resume. (The bold lines indicate that the sensor controls the SDA/SCL lines.)



3.4 Data transfer format

Data is transferred in byte packets in the I²C protocol, which means in 8-bit frames. Each byte is followed by an acknowledge bit. Data is transferred with the most significant bit (MSB) first.

A data transfer sequence is initiated by the master generating the Start condition (S) and sending a header byte. The I²C header consists of the 7-bit I²C device address and the data direction bit (R/_W).

The value of the R/_W bit in the header determines the data direction for the rest of the data transfer sequence. If R/_W = 0 (WRITE) the direction remains master-to-slave, while if R/_W = 1 (READ) the direction changes to slave-to-master after the header byte.

4. Command Set and Data Transfer Sequences

A command is represented by an 8-bit command code. The data direction may not change after the command byte, since the R/_W bit of the preceding I²C header has already determined the direction to be master-to-slave. In order to execute commands in Read mode using I²C, the following principle is used. On successful (acknowledged) receipt of a command byte, the sensor stores the command nibble internally. The Read mode of this command is then invoked by initiating an I²C data transfer sequence with R/_W = 1.

If a correctly addressed sensor recognizes a valid command and access to this command is granted, it responds by pulling down the SDA line during the subsequent SCL pulse for the acknowledge signal (ACK). Otherwise it leaves the SDA line unasserted (NACK).

The two most important commands are described in this data sheet, and the data transfer sequences are specified. Contact Sensirion for advanced sensor options.

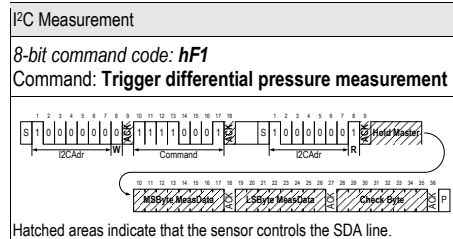
4.1 Measurement triggering

Each individual measurement is triggered by a separate read operation.

Note that two transfer sequences are needed to perform a measurement. First write command byte hF1 (trigger measurement) to the sensor, and then execute a read operation to trigger the measurement and retrieve the flow or differential pressure information.

On receipt of a header with R/_W=1, the sensor generates the Hold Master condition on the bus until the first measurement is completed. After the Hold Master condition is released, the master can read the result as two consecutive bytes. A CRC byte follows if the master continues clocking the SCL line after the second result

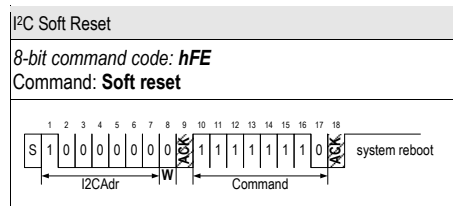
byte. The sensor checks whether the master sends an acknowledge after each byte and aborts the transmission if it does not.



Note that the first measurement result after reset is not valid.

4.2 Soft reset

This command forces a sensor reset without switching the power off and on again. On receipt of this command, the sensor reinitializes the control/status register contents from the EEPROM and starts operating according to these settings.



4.3 CRC-8 Redundant Data Transmission

Cyclic redundancy checking (CRC) is a popular technique used for error detection in data transmission. The transmitter appends an n-bit checksum to the actual data sequence. The checksum holds redundant information about the data sequence and allows the receiver to detect transmission errors. The computed checksum can be regarded as the remainder of a polynomial division, where the dividend is the binary polynomial defined by the data sequence and the divisor is a "generator polynomial".

The sensor implements the CRC-8 standard based on the generator polynomial

$$x^8 + x^5 + x^4 + 1.$$

Note that CRC protection is only used for data transmitted from the slave to the master.

For details regarding cyclic redundancy checking, please refer to the relevant literature.



5. Conversion to Physical Values

5.1 Signal scaling and physical unit

The calibrated signal read from the sensor is a signed INTEGER number (two's complement number). The INTEGER value can be converted to the physical value by dividing it by the scale factor (pressure = sensor output ÷ scale factor). The scale factor is specified in Section 2.

5.2 Temperature compensation

The SDP600 sensor series features digital temperature compensation. The temperature is measured on the CMOSens® chip by an on-chip temperature sensor. This data is fed to a compensation circuit that is also integrated on the CMOSens® sensor chip. No external temperature compensation is necessary.

5.3 Mass flow temperature compensation

A sensor output proportional to mass flow is necessary for measuring mass flow in a bypass configuration. Even though the output of the SDP sensors with mass flow temperature compensation is still differential pressure, the temperature compensation is adapted especially for mass flow measurements in a bypass configuration. At calibration temperature both calibrations are equivalent. Please find the application note "Bypass Configuration Differential Pressure Sensor SDPxxx" on our website.

5.4 Altitude correction

The SDP600 sensor series achieves its unsurpassed performance by using a dynamic measurement principle. The applied differential pressure forces a small flow of gas through the sensor, which is measured by the flow sensor element. As a result, any variation in gas density affects the sensor reading. While temperature effects are compensated internally, variations in atmospheric pressure (elevation above sea level) can be compensated by a correction factor according to the following formula:

$$DP_{\text{eff}} = DP_{\text{sensor}} \times (P_{\text{cal}} / P_{\text{amb}})$$

DP_{eff}: Effective differential pressure

DP_{sensor}: Differential pressure indicated by the sensor

P_{cal}: Absolute pressure at calibration (966 mbar)

P_{amb}: Actual ambient absolute pressure.

Altitude correction factors:

Altitude [meters]	Ambient pressure (P _{amb}) [mbar]	Correction factor (P _{cal} / P _{amb})
0	1013	0.95
250	984	0.98
425	966	1.00
500	958	1.01
750	925	1.04

1500	842	1.15
2250	766	1.26
3000	697	1.38

Example: At 750 m above sea level and a sensor reading of 40 Pa, the effective differential pressure is 41.8 Pa.

Note: In many HVAC applications such as air flow measurement in a bypass configuration, the described dependence on absolute pressure is actually welcome because the quantity that must effectively be controlled is the mass flow and not the volume flow. Mass flow is dependent on differential pressure and absolute pressure. For details please refer to our application note "Measuring Flow in a Bypass Configuration".

6. OEM Options

A variety of custom options can potentially be implemented for high-volume OEM applications. Contact Sensirion for more information.



7. Mechanical Specifications

7.1 Mechanical concept

The SDP600 Series is designed for through-hole technology and can be wave-soldered or hand-soldered to a PCB.

- The SDP60x/SDP50x can be directly connected to a manifold using two O-rings.
- The SDP61x/SDP51x sensors have ports for connecting standard-size plastic tubes.

7.2 Mechanical characteristics

Parameter	
PCB attachment	Clip-in and hand or wave soldering. Additional mechanical attachment depending on force requirements
Allowable overpressure	1 bar (100 kPa, 400 inches H ₂ O)
Rated burst pressure	> 5 bar
Gas flow through sensor	< 150 ml/min
Weight	< 6 g
Protection rating	IP 30

7.3 SDP60x/SDP50x – Manifold connection

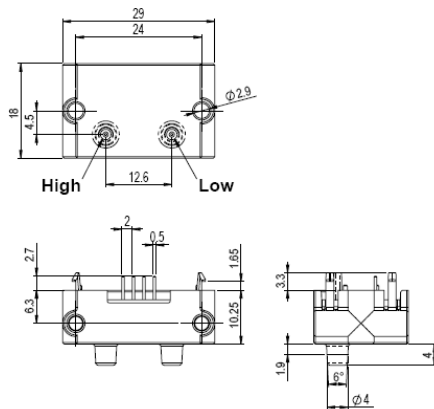


Figure 1: SDP60x/SDP50x manifold mount version. All dimensions are in mm.

Sensirion recommends O-rings with the following dimensions:

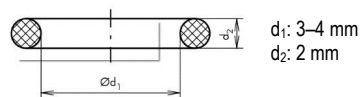


Figure 2: Cross section of recommended O-ring

7.4 SDP61x/SDP51x – Tube connection

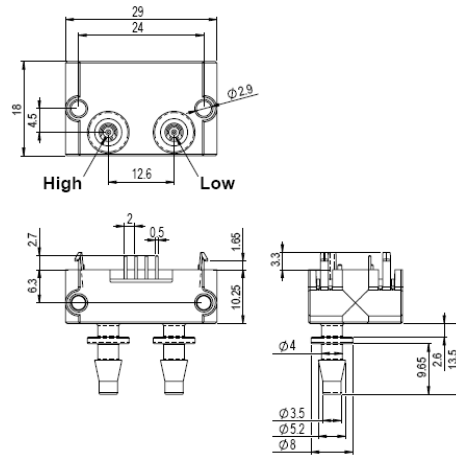


Figure 3: SDP61x/SDP51x version with ports for tube connection. All dimensions are in mm.

7.5 Pin assignments

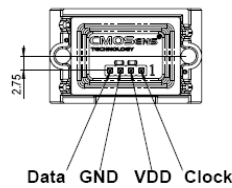


Figure 4: Digital output pin assignments (bottom view).

7.6 Footprint

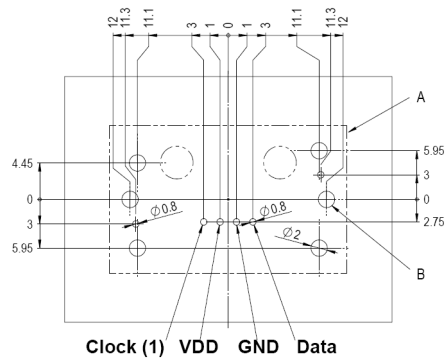


Figure 5: Footprint for PCB mounting. (top view = sensor side). All dimensions in mm.

A: Overall sensor dimensions

B: Holes for additional mounting screws (optional)

8. Instructions for Use

8.1 Soldering instructions

Standard wave soldering systems may be used for soldering SDP600 series sensors. Reflow soldering is **not** feasible and may damage the sensor.

The sensor ports must be protected from solder splash and flux during soldering. Figure 6 shows an appropriate temperature profile with maximum temperature values.

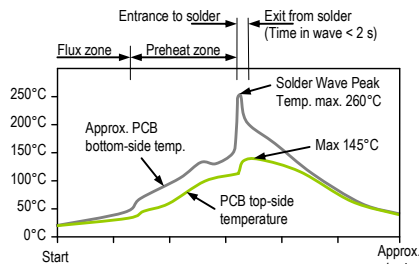


Figure 6: Suitable wave soldering profile.

The characteristics of wave soldering machines vary, so any soldering setup must be tested before production use.

8.2 Sensor handling

The sensors of the SDP600 series are designed to be robust and vibration resistant. Nevertheless, the accuracy of the high-precision SDP600 series can be degraded by rough handling. Sensirion does not guarantee proper operation in case of improper handling. **Note:** avoid applying any mechanical stress to the solder joints of the sensor during or as a result of PCB assembly.

The sensor ships in an antistatic package to prevent electrostatic discharge (ESD), which can damage the part. To avoid such damage, ground yourself using a grounding strap or by touching a grounded object. Furthermore store the parts in the antistatic package when not in use.

8.3 Additional attachment

If necessary, the robustness of the sensor attachment to the PCB can be increased by using a bracket as shown in Figure 7.

Sensirion recommends using this additional bracket when the sensor is fitted to a PCB. The bracket must be secured before the pins are soldered to the PCB, as otherwise sensor performance may be degraded by mechanical stress.

SENSIRION
THE SENSOR COMPANY

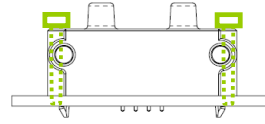


Figure 7: Supplementary bracket for the SDP600 series.

8.4 Air flow and tubing

Due to the dynamic measurement principle, a small air flow is required.

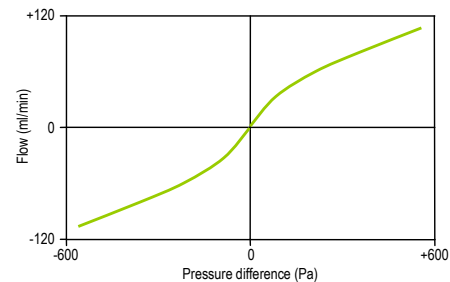


Figure 8: Typical air flow through the SDP600 series sensor.

Note: 1 sccm = 1 cm³/min at 0°C and 1013 mbar
(1 sccm = 0.001 standard liter).

This air flow through the sensor creates a dependence on the tube length. The error is less than 1% with a tube length up to 1 m (with 3/16 inch inside diameter).

9. Ordering Information

Use the part names and item numbers shown in the following table when ordering SDP600 series differential pressure sensors. For the latest product information and local distributors, visit www.sensirion.com.

Part name	Description / Output	Calibrated range	"Mass flow"	Span accuracy	Product number 1-10xxxx-xx
SDP500	I ² C, manifold mount	0 to +500 Pa (0 to +2 in. H ₂ O)		4.5%	0601-02
SDP510	I ² C, tube connection	0 to +500 Pa (0 to +2 in. H ₂ O)		4.5%	0602-02
SDP501	I ² C, manifold mount	0 to +500 Pa (0 to +2 in. H ₂ O)	x	4.5%	1314-01
SDP511	I ² C, tube connection	0 to +500 Pa (0 to +2 in. H ₂ O)	x	4.5%	1315-01
SDP600-500Pa	I ² C, manifold mount	±500 Pa (±2 in. H ₂ O)		3%	0456-02
SDP610-500Pa	I ² C, tube connection	±500 Pa (±2 in. H ₂ O)		3%	0455-02
SDP600-125Pa	I ² C, manifold mount	±125 Pa (±0.5 in. H ₂ O)		3%	0760-02
SDP610-125Pa	I ² C, tube connection	±125 Pa (±0.5 in. H ₂ O)		3%	0761-02
SDP600-25Pa	I ² C, manifold mount	±25 Pa (±0.1 in. H ₂ O)		3%	0758-02
SDP610-25Pa	I ² C, tube connection	±25 Pa (±0.1 in. H ₂ O)		3%	0759-02
SDP601-500Pa	I ² C, manifold mount	±500 Pa (±2 in. H ₂ O)	x	3%	0603-02
SDP611-500Pa	I ² C, tube connection	±500 Pa (±2 in. H ₂ O)	x	3%	0604-02

Packaging units: 80 items/tray and 480 items/box.

9.1 Packaging

Housing: The sensor housing consists of PBT. The device is fully RoHS compliant – it is free of Pb, Cd, Hg, Cr(6+), PBB and PBDE.

Each sensor is labeled by laser printing on the front side:

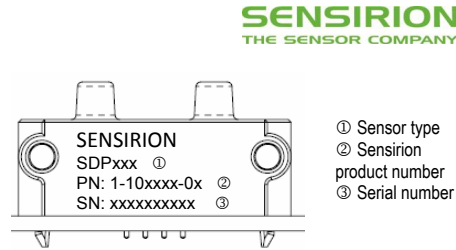


Figure 9: Marking of the housing.

Traceability Information: SDPxxx are shipped in trays of 80pcs. The tray dimension is 355mm x 255mm x 21.5mm. By piling them up, the height per tray can be considered as 19mm. For traceability, each tray is marked with a label. No information can be derived from the code directly, respective data is stored at Sensirion AG and is provided upon request.

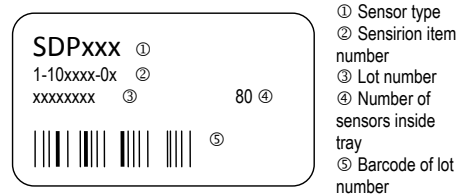


Figure 10: Label sticking on each tray

Revision history

Date	Author	Version	Changes
Sept, 2008	PHA	V1.0	Initial release
Nov, 2008	PHA	V1.1	Small amendments (power consumption, asymmetric lines and US office address)
Jan, 2009	PHA	V1.2	Explanation to SDP5x0 calibration range, media compatibility extended
Feb, 2009	PHA	V1.3	Packaging information added, sensor handling instruction
Nov, 2009	PHA	V1.4	Zero point accuracy changed. Supply voltage requirements and recommendations relaxed.
January, 2011	DAT	V1.5	Introduction of low power versions (SDP6x6) and low differential pressure versions SDP6xx-125Pa / SDP6xx-25Pa.
Feb, 2011	VVO	V1.6	Calibrated Temperature Range is extended, minor corrections
Sept, 2012	ANB	V1.7	Updated Product Number.
June, 2015	ANB	V1.8	Added SDP5x1. Moved SDP6x6 to separate datasheet. Minor updates.
July, 2015	ANB	V1.9	Fixed broken link in chapter 5.



Important Notices

Warning, personal injury

Do not use this product as safety or emergency stop devices or in any other application where failure of the product could result in personal injury (including death). Do not use this product for applications other than its intended and authorized use. Before installing, handling, using or servicing this product, please consult the datasheet and application notes. Failure to comply with these instructions could result in death or serious injury.

If the Buyer shall purchase or use SENSIRION products for any unintended or unauthorized application, Buyer shall defend, indemnify and hold harmless SENSIRION and its officers, employees, subsidiaries, affiliates and distributors against all claims, costs, damages and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if SENSIRION shall be allegedly negligent with respect to the design or the manufacture of the product.

ESD Precautions

The inherent design of this component causes it to be sensitive to electrostatic discharge (ESD). To prevent ESD-induced damage and/or degradation, take customary and statutory ESD precautions when handling this product.

See application note "Handling Instructions" for more information.

Warranty

SENSIRION warrants solely to the original purchaser of this product for a period of 12 months (one year) from the date of delivery that this product shall be of the quality, material and workmanship defined in SENSIRION's published specifications of the product. Within such period, if proven to be defective, SENSIRION shall repair and/or replace this product, in SENSIRION's discretion, free of charge to the Buyer, provided that:

- notice in writing describing the defects shall be given to SENSIRION within fourteen (14) days after their appearance;

- such defects shall be found, to SENSIRION's reasonable satisfaction, to have arisen from SENSIRION's faulty design, material, or workmanship;
- the defective product shall be returned to SENSIRION's factory at the Buyer's expense; and
- the warranty period for any repaired or replaced product shall be limited to the unexpired portion of the original period.

This warranty does not apply to any equipment which has not been installed and used within the specifications recommended by SENSIRION for the intended and proper use of the equipment. EXCEPT FOR THE WARRANTIES EXPRESSLY SET FORTH HEREIN, SENSIRION MAKES NO WARRANTIES, EITHER EXPRESS OR IMPLIED, WITH RESPECT TO THE PRODUCT. ANY AND ALL WARRANTIES, INCLUDING WITHOUT LIMITATION, WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, ARE EXPRESSLY EXCLUDED AND DECLINED.

SENSIRION is only liable for defects of this product arising under the conditions of operation provided for in the datasheet and proper use of the goods. SENSIRION explicitly disclaims all warranties, express or implied, for any period during which the goods are operated or stored not in accordance with the technical specifications.

SENSIRION does not assume any liability arising out of any application or use of any product or circuit and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. All operating parameters, including without limitation recommended parameters, must be validated for each customer's applications by customer's technical experts. Recommended parameters can and do vary in different applications.

SENSIRION reserves the right, without further notice, (i) to change the product specifications and/or the information in this document and (ii) to improve reliability, functions and design of this product.

Copyright © 2001-2015, SENSIRION.
CMOSens® is a trademark of Sensirion
All rights reserved

Headquarters and Subsidiaries

SENSIRION AG
Laubisruetistr. 50
CH-8712 Staefa ZH
Switzerland

phone: +41 44 306 40 00
fax: +41 44 306 40 30
info@sensirion.com
www.sensirion.com

Sensirion AG (Germany)
phone: +41 44 927 11 66
info@sensirion.com
www.sensirion.com

Sensirion Inc., USA
phone: +1 805 409 4900
info_us@sensirion.com
www.sensirion.com

Sensirion Japan Co. Ltd.
phone: +81 3 3444 4940
info@sensirion.co.jp
www.sensirion.co.jp

Sensirion Korea Co. Ltd.
phone: +82 31 337 7700~3
info@sensirion.co.kr
www.sensirion.co.kr

Sensirion China Co. Ltd.
phone: +86 755 8252 1501
info@sensirion.com.cn
www.sensirion.com.cn

To find your local representative, please visit www.sensirion.com/contact



Datasheet Evaluation Kit EK-P3

For SDP600 series differential pressure Sensors

- Evaluation Kit
- Applicable to SDP5xx/6xx/7xx sensors
- Viewer Software for download
- Easy connection via USB Interface



Product Summary

The evaluation kit EK-P3 contains everything needed for fast evaluation and qualification of the SDP600 series differential pressure sensors. It contains a USB dongle, a SDP610 differential pressure sensor and an adapter cable to connect the sensor to the USB-dongle.

With this equipment, first measurements can be done within a couple of minutes.

The viewer software can be downloaded from the Sensirion web page and includes some simple data-logger features.

Set Up of EK-P3

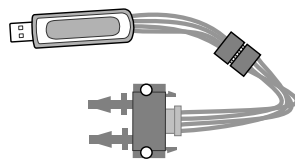


Figure 1 Schematic of Evaluation Kit EK-P3. USB Dongle with I2C to USB converter. SDP6xx sensor is connected via plug to this USB dongle. Viewer software must be downloaded from the Sensirion web page.

Material Contents

- **1 EK-P3 USB Stick:** Contains USB to I2C translator capabilities.
- **1 Sensor cable** of 20 cm length with plug for connecting sensors with USB dongle.
- **1 SDP610 sensor:** Digital Sensor with I2C output.

Please refer to datasheet for the SDP600 series for more details:

http://www.sensirion.com/en/pdf/product_information/Data_sheet_SDP600series_differential_pressure_sensor.pdf

Installation Guide

Step 1: Connect USB-stick to PC and install viewer software. Viewer Software must be downloaded from the Sensirion web page at:
http://www.sensirion.com/en/Installationsprogramme/USB-Sensor-Viewer_Setup.msi.

Step 2: Connect the sensor via the adapter cable to the USB-stick (see figure 2).

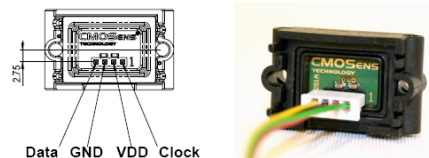
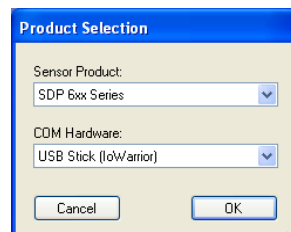


Figure 2 Pin assignment of SDP6xx on PCB top view from left to right. Connect cable such that yellow cable is connected to data, black (GND), red (Vdd) and green (clock).

WARNING: Reverse polarity connection might damage sensor permanently.

Step 3: Start software. Please note that the USB stick, sensor cable and sensor must be connected to the computer before starting the software. Please choose SDP6xx series and press OK button.



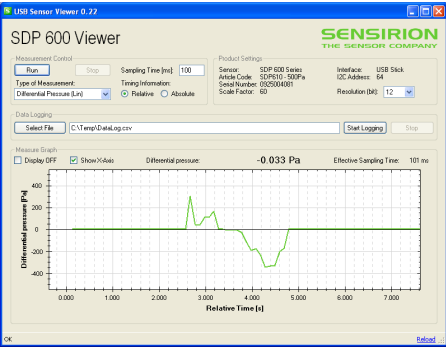
Step 4: Press run to start the measurement or chose advanced settings like described in the next section.

Viewer Software

The viewer software displays differential pressure over time. It allows selecting all available resolutions, absolute or relative timing and free choice of sampling time (sampling time is limited to 8 ms due to the USB-stick not because of the sensor). Furthermore, the output signal

Datasheet EK-P3

may be displayed as linearized or raw data. The data can be logged, stored and exported to Excel format.



When starting the viewer software, the right sensor must be selected in a first window (please select SDP 600 series). The settings must be chosen and then the



measurement may be started. Choose the type of measurement, the resolution and sampling time and press the run button. The software has a simple data logger feature which saves data as csv-file.

Device Certification

The Evaluation Kit EK-P3 is RoHS and WEEE compliant.

Ordering Information

Use the part names and item numbers shown in the following table when ordering the EK-P3 evaluation kit. For the latest product information and local distributors, visit www.sensirion.com.

Part name	Description / Output	Item number
EK-P3	SDP600 series evaluation kit	1-100766-01

Revision History

Date	Version	Page(s)	Author	Changes
August 2010	1.0	1 – 3	DAT	Initial release
December 2010	1.1	2	DAT	New Link to Software



Important Notice

Warning, Personal Injury

Do not use this product as safety or emergency stop devices or in any other application where failure of the product could result in personal injury. Do not use this product for applications other than its intended and authorized use. Before installing, handling, using or servicing this product, please consult the data sheet and application notes. Failure to comply with these instructions could result in death or serious injury.

If the Buyer shall purchase or use SENSIRION products for any unintended or unauthorized application, Buyer shall defend, indemnify and hold harmless SENSIRION and its officers, employees, subsidiaries, affiliates and distributors against all claims, costs, damages and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if SENSIRION shall be allegedly negligent with respect to the design or the manufacture of the product.

ESD Precautions

The inherent design of this component causes it to be sensitive to electrostatic discharge (ESD). To prevent ESD-induced damage and/or degradation, take customary and statutory ESD precautions when handling this product.

See application note "ESD, Latchup and EMC" for more information.

Warranty

SENSIRION warrants solely to the original purchaser of this product for a period of 12 months (one year) from the date of delivery that this product shall be of the quality, material and workmanship defined in SENSIRION's published specifications of the product. Within such period, if proven to be defective, SENSIRION shall repair and/or replace this product, in SENSIRION's discretion, free of charge to the Buyer, provided that:

- notice in writing describing the defects shall be given to SENSIRION within fourteen (14) days after their appearance;

- such defects shall be found, to SENSIRION's reasonable satisfaction, to have arisen from SENSIRION's faulty design, material, or workmanship;
- the defective product shall be returned to SENSIRION's factory at the Buyer's expense; and
- the warranty period for any repaired or replaced product shall be limited to the unexpired portion of the original period.

This warranty does not apply to any equipment which has not been installed and used within the specifications recommended by SENSIRION for the intended and proper use of the equipment. EXCEPT FOR THE WARRANTIES EXPRESSLY SET FORTH HEREIN, SENSIRION MAKES NO WARRANTIES, EITHER EXPRESS OR IMPLIED, WITH RESPECT TO THE PRODUCT. ANY AND ALL WARRANTIES, INCLUDING WITHOUT LIMITATION, WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, ARE EXPRESSLY EXCLUDED AND DECLINED.

SENSIRION is only liable for defects of this product arising under the conditions of operation provided for in the data sheet and proper use of the goods. SENSIRION explicitly disclaims all warranties, express or implied, for any period during which the goods are operated or stored not in accordance with the technical specifications.

SENSIRION does not assume any liability arising out of any application or use of any product or circuit and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. All operating parameters, including without limitation recommended parameters, must be validated for each customer's applications by customer's technical experts. Recommended parameters can and do vary in different applications.

SENSIRION reserves the right, without further notice, (i) to change the product specifications and/or the information in this document and (ii) to improve reliability, functions and design of this product.

© Copyright 2010 by SENSIRION.

CMOSens® is a trademark of SENSIRION

All rights reserved

Headquarter and Sales Offices

Headquarter

SENSIRION AG
Laubisruetistr. 50
CH-8712 Staefa ZH
Switzerland

Phone: +41 44 306 40 00
Fax: +41 44 306 40 30
info@sensirion.com
<http://www.sensirion.com/>

Sales Office USA:

SENSIRION Inc.
2801 Townsgate Rd., Suite 204
Westlake Village, CA 91361
USA

Phone: +1 805 409 4900
Fax: +1 805 435 0467
michael.karst@sensirion.com
<http://www.sensirion.com/>

Sales Office Japan:

SENSIRION JAPAN Co. Ltd.
Postal Code: 108-0074
Shinagawa Station Bldg. 7F,
4-23-5, Takanawa, Minato-ku
Tokyo, Japan

Phone: +81 3 3444 4940
Fax: +81 3 3444 4939
info@sensirion.co.jp
<http://www.sensirion.co.jp>

Sales Office Korea:

SENSIRION KOREA Co. Ltd.

Phone: +82 31 440 9925-27

#1414, Anyang Construction Tower B/D,
1112-1, Bisan-dong, Anyang-city
Gyeonggi-Province
South Korea

Fax: +82 31 440 9927
info@sensirion.co.kr
<http://www.sensirion.co.kr>

Sales Office China:

Sensirion China Co. Ltd.
Room 2411, Main Tower
Jin Zhong Huan Business Building,
Futian District, Shenzhen,
Postal Code 518048
PR China

phone: +86 755 8252 1501
fax: +86 755 8252 1580
info@sensirion.com.cn
www.sensirion.com.cn

Find your local representative at: <http://www.sensirion.com/rep>

A.7 SENSOR DE VELOCITAT

S'adjunten les característiques facilitades pel fabricant del sensor de velocitat utilitzat:



VELOPORT 20

Air Velocity Hand-Held

Checking out air streams in HVAC systems and clean rooms with a hand-held air velocity meter can help to detect possible system failures even before they occur, preventing expensive breakdowns. The hand-held air velocity meters of the VELOPORT Series set new standards in advanced technology and ease of control with the innovative thumbwheel. The VELOPORT measures besides air velocity the temperature of the air stream as well.

The utilized E+E thin-film air velocity sensor operates as a hot film anemometer, providing the highest accuracy even at air velocities below 0.5m/s (100ft/min).

The calibration data is stored in the very thin interchangeable probe. The small diameter of 6mm (0.2") allows measurements in difficult accessible places.

Excellent readability of the large illuminated display, the easy thumbwheel operation, and the robust housing allows the use of the VELOPORT in the most hazardous industrial environments.

An optional carrying case can accommodate the basic device with up to 2 sensing probes and an E+E factory certificate.



VELOPORT 20



VELOPORT 20 SET

Typical Applications

ventilation ducts
HVAC
clean rooms

Features

measuring ranges: 0...2m/s (0...400ft/min) and
0...20m/s (0...4000ft/min)
interchangeable probes
HOLD / MIN / MAX / AVG readout
auto power off
real time clock (date / time)
m/s <-> fpm and °C <-> °F selectable
v + T recalibration by the user

Technical Data

Measuring values	Air Velocity	Temperature
Sensor type	combined E+E air velocity / temperature sensor	
Measuring range (depends on probe)	0...2m/s (0...400ft/min) 0...20m/s (0...4000ft/min)	-20...70°C (-4...158°F)
Accuracy air velocity at 23°C (73.4°F)	probe 0.08...2m/s: ±(0.04m/s / 7.9ft/min + 1% of measured value) probe 0.2...20m/s: ±(0.2m/s / 39.4ft/min + 2% of measured value)	
Accuracy temperature at 0...50°C (32...122°F)		±0.7°C (±1.26°F)
Resolution	0.01m/s (2ft/min)	0.1°C (±0.18°F)
Response time τ_{90} ¹⁾	<1.5s	<1.5s
General		
Supply voltage	4x 1.5V AA alkali-manganese battery	
Battery lifetime	typ. 40h	
Working temperature range	housing: 0...50°C (32...122°F)	probe: -20...70°C (-4...158°F)
Electromagnetic compatibility	EN50081-2 EN61000-4-2	EN50082-2 EN61000-4-3 EN55011
Housing / protection class	ABS / IP40	
Dimensions	hand-held base: probe: cable length:	LxWxD: 145 x 85 x 37mm (5.7 x 3.3 x 1.5") Ø 6mm (0.2"), length: 200mm (7.9") approx. 1m (3.3ft)
Weight hand-held base	approx. 400g (1lbs)	
Display	illuminated LC display, 90 x 50mm (3.5 x 1.9")	

¹⁾ Response time τ_{90} is measured from the beginning of a step change of air velocity to the moment of reaching 90% of the step.

Ordering Guide

MODEL	ACCESSORIES
Hand-held base (without probe) (VELOPORT 20)	air velocity / temperature probe 0...2m/s (0...400ft/min) (HA040401) air velocity / temperature probe 0...20m/s (0...4000ft/min) (HA040402) Set (carrying case incl. basic device + 2 probes + accessories) (HA040901)

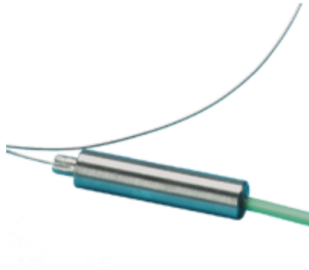
v1.4

VELOPORT 20

A.8 SENSOR DE TEMPERATURA

S'adjunten les característiques facilitades pel fabricant (TC-Direct) del sensor de temperatura:

Termopar de Aislamiento Mineral – Diámetro 0.25, 0.5 y 0.75mm



Estos sensores miniatura semi-rígidos son ideales para gran variedad de aplicaciones donde se requiere una muy buena precisión debido a su respuesta, tamaño, manejo y robustez. Apto para aplicaciones variadas desde trabajo en laboratorio hasta situaciones donde los cambios de temperatura son rápidos o requieren un sensor capaz de soportar cambios bruscos. Tienen unión aislada para evitar retornos de masa y se pueden deformar para adaptarlos a una aplicación en particular sin que pierda prestaciones. Se suministra con 2 metros de cable aislado con PFA. También puede encontrar en este catálogo una amplia gama de cables de extensión y racores de compresión ajustables para completar este producto.

- Respuesta rápida, tamaño reducido y fácil manejo
- Termopar tipo K, T ó J (para diámetro 0.25mm - sólo tipo K)
- Diámetro de la vaina: 0.25mm, 0.5mm ó 0.75mm
- Disponible en varias longitudes
- Material de la vaina: Tipo K, T ó J - Acero Inoxidable AISI 321(0.75mm - Inconel 600 / AISI 310), Tipo N - Microbell D
- Rango: -100°C a 800°C
- Unión aislada
- Cable: 2 metros aislados con PFA
- Terminado en casquillo que soporta 85°C
- Versión 0.25mm de diámetro suministrado en estuche de protección

S'ha utilitzat un sensor de tipus K amb codi 406 – 475.

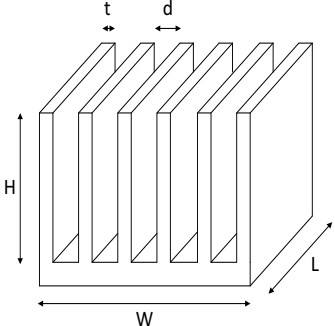
ANNEX B. CÀLCULS

Es detallaran els càlculs que s'han realitzat durant el desenvolupament del treball.

B.1 DIMENSIONS DISSIPADOR

Per als càlculs plantejats, s'han tingut en compte les dimensions dels dos dissipadors utilitzats durant els assajos (taula 2). La taula 11 mostra les dimensions generals d'un dissipador juntament amb el significat de cada variable assignada.

Taula 11. Dimensions generals del dissipador.

DISSIPADOR	
	
H	Alçada
W	Amplada
L	Profunditat
t	Gruix d'aleta
d	Amplada del canal

B.2 MODEL TÈRMIC

El model tèrmic estudiat consisteix en un seguit de resistències tèrmiques que van des de la base del material ceràmic utilitzat per mesurar el flux de calor fins a l'aire forçat ambient.

La figura 17, complementada amb la informació de la taula 9 (ambdues a la pàgina 31), defineix el model tèrmic estudiat.

A partir de la informació anterior, es pot calcular quina serà la potència neta màxima teòrica que produirà el TEM. Per això es precisa conèixer, de forma teòrica, quines seran les temperatures $T_{TEM,h}$ i $T_{TEM,c}$.

D'acord amb la figura 17 (pàgina 31) i coneixent les temperatures $T_{cer,h}$ i T_{amb} mesurades experimentalment, s'estableixen les següents equacions per a cada valor de resistència tèrmica, on s'ha suposat que no hi ha pèrdues a l'ambient i que la potència produïda pel generador termoelèctric és menor al flux de calor a la base de la ceràmica Q_i .

$$R_{cer} = \frac{T_{cer,h} - T_{cer,c}}{Q_i} \quad (16)$$

$$R_{ct,1} = \frac{T_{cer,c} - T_{TEM,h}}{Q_i} \quad (17)$$

$$R_{TEM} = \frac{T_{TEM,h} - T_{TEM,c}}{Q_i} \quad (18)$$

$$R_{ct,2} = \frac{T_{TEM,c} - T_{hs,h}}{Q_i} \quad (19)$$

$$R_{hs,cd} = \frac{T_{hs,h} - T_{hs,c}}{Q_i} \quad (20)$$

$$R_{hs,cv} = \frac{T_{hs,c} - T_{amb}}{Q_i} \quad (21)$$

Com s'ha comentat, en les equacions anteriors no s'ha considerat la P_{TEM} ja que és menyspreable en comparació a Q_i ($P_{TEM} \ll Q_i$).

A partir de les equacions (16) a (21) es tenen 6 incògnites: $T_{cer,c}$, $T_{TEM,h}$, $T_{TEM,c}$, $T_{hs,h}$, $T_{hs,c}$ i Q_i , on Q_i és el flux de calor a la base de la ceràmica.

La manera més usual de resoldre-ho és sumar les equacions anteriors i aïllar Q_i :

$$Q_i = \frac{T_{cer,h} - T_{amb}}{R_{cer} + R_{ct,1} + R_{TEM} + R_{ct,2} + R_{hs,cd} + R_{hs,cv}} \quad (22)$$

Tots els termes que apareixen a la dreta de l'equació són coneguts o es poden calcular.

Termes coneguts:

- $T_{cer,h}$: Temperatura cara calenta de la ceràmica.
- T_{amb} : Temperatura ambient.
- $R_{ct,1}$, $R_{ct,2}$: Resistències de contacte 1 i 2.

Termes que es poden calcular:

$$R_{cer} = \frac{t_{cer}}{k_{cer} \cdot A_{cer}} \quad (23)$$

On:

- t_{cer} : 0,0030 [m] és el gruix del material ceràmic.
- k_{cer} : 1,36 [W/m·K] és la conductivitat tèrmica del material ceràmic.
- A_{cer} : 0,0016 [m²] és l'àrea efectiva del material ceràmic.

$$R_{hs,cd} = \frac{t_{hs,b}}{k_{hs} \cdot A_{hs}} \quad (24)$$

On:

- $t_{hs,b}$: És el gruix de la base del dissipador [m].
- k_{hs} : 200 [W/m·K] és la conductivitat tèrmica del dissipador (alumini).
- A_{hs} : És l'àrea efectiva del dissipador [m²].

$$R_{TEM} = K_{eff,TEM}^{-1} \quad (25)$$

On:

- $K_{eff,TEM}$: És la conductància efectiva del termoelèctric que aquí es suposa constant i, per simplificar, es calcula a partir de les dades del fabricant.

$$K_{eff,TEM} = \frac{Q_{h,f}}{T_{h,f} - T_{c,f}} \quad (26)$$

On:

- $Q_{h,f}$: És el flux de calor en el punt de funcionament que detalla el fabricant [W].
- $T_{h,f}$: És la temperatura de la cara calenta del punt de funcionament segons el fabricant [°C].
- $T_{c,f}$: És la temperatura de la cara freda del punt de funcionament segons el fabricant [°C].

Finalment es calcula $R_{hs,cv}$ segons les equacions de Lindstedt i Karvinen (Lindstedt et al., 2012):

$$R_{hs,cv} = \frac{\Delta T_{max}}{n\phi_i\eta} \quad (27)$$

On:

$$\frac{\phi_i}{\Delta T_{max}} = \rho c_p v H d [1 - \exp(-4L^* Nu_{m,T})] \quad (28)$$

On:

- v : És la velocitat de l'aire [m/s].
- ρ : És la densitat de l'aire a l'entrada [kg/m³].
- c_p : És la calor específica de l'aire [J/Kg·K].
- L^* : Es pot deduir segons l'equació (29) següent.

$$L^* = \frac{L}{D_h Re Pr} \quad (29)$$

De l'equació (29) s'obté:

- D_h : És el diàmetre hidràulic [m] corresponent a un canal i es calcula segons (30).

$$D_h = \frac{4dH}{2d + 2H} \approx 2d \quad (30)$$

per $d \ll H$ (equacions anteriors vàlides per $H/D > 10$).

- Pr : Nombre de Prandtl. Es calcula com:

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k_f} \quad (31)$$

- Re : Nombre de Reynolds. Es calcula com:

$$Re = \frac{v D_h}{\nu_c} \quad (32)$$

On:

- ν_c : És la viscositat cinemàtica de l'aire.
- v : És la velocitat de l'aire a través d'un canal calculada com:

$$v = \frac{\dot{V}}{mHd} \quad (33)$$

On:

- m : És el nombre de canals.
- \dot{V} : És el cabal d'aire que circula pel dissipador.

Un cop calculats els termes anteriors, es segueix amb l'últim terme de l'equació (28):

$$Nu_{m,T} = 7,55 + \frac{0,024 L^{*-1,14}}{1 + 0,0358 Pr^{0,17} L^{*-0,64}} \quad (34)$$

Finalment es calcula l'eficiència η a (27) com a:

$$\eta = \frac{\tanh(X)}{X} \quad (35)$$

On:

$$X = \sqrt{Nu_{m,T}^\infty Y} \quad (36)$$

On:

$$Y = \frac{k_f H^2}{k_{hs} dt} \quad (37)$$

$$Nu_{m,T}^\infty = [1 - \exp(-4L^* Nu_{m,T})]/(4L^*) \quad (38)$$

On:

- k_f i k_{hs} : Corresponen a la conductivitat tèrmica del fluid (aire) i del dissipador (alumini) amb valors de 0,026 [W/m·K] i 200 [W/m·K] respectivament.

Amb aquests termes es pot calcular Q_i un cop conegut \dot{V} .

Una vegada calculat (22) es poden calcular totes les temperatures substituint el valor Q_i trobat en les equacions (16) – (21) anteriors.

B.3 MODEL TEM

A partir de les temperatures ja calculades es pot calcular la potència del TEM com:

$$P_{TEMmax} = \alpha^2 n_p^2 \frac{(T_{TEM,h} - T_{TEM,c})^2}{4R} \quad (39)$$

On:

- R: És la resistència [Ω] interna del mòdul. Es calcula com:

$$R = \frac{\alpha(T_{h,TEG} - T_{c,TEG})}{I} - R_L \quad (40)$$

On:

- o R_L : És la resistència externa de càrrega. Com en l'experiment el punt de treball era molt proper al punt de màxima potència, la resistència interna R és molt propera a R_L . Pel càlculs, s'agafen els valors mitjos del Seebeck i de R, per simplificar.

Es segueix amb els termes de l'equació (39):

- n_p : És el número de pellets que hi ha el mòdul.
- α : És el coeficient Seebeck. Es calcula com:

$$\alpha = \frac{V_{oc}}{(T_{h,TEM} - T_{c,TEM})} \quad (41)$$

On:

- V_{oc} : És el voltatge en circuit obert.

B.4 POTÈNCIA DEL VENTILADOR

La potència necessària per moure el fluid al pas del dissipador es calcula com:

$$P_{fan} = \dot{V} \cdot \Delta p \quad (42)$$

On:

- Δp : És la caiguda de pressió [Pa] al pas del dissipador. Es defineix a partir de Lindstedt i Karvinen (Lindstedt et al., 2012).

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho v^2 (K_c + 4L^+ f_{app} Re + K_e) \quad (43)$$

- On:

- ρ : Densitat del fluid [Kg/m^3].
- v : És la velocitat del fluid al pas del dissipador (en un canal entre aletes).
- K_c i K_e : Coeficients de pèrdues de càrrega secundàries per contracció i expansió respectivament. Es determinen segons:

$$K_c = 0,4(1 - \sigma^{2,1}) \quad (44)$$

On:

- $\sigma = d/(d+t)$ només depèn de les dimensions del canal (veure taula 11).

Per K_e s'escull un valor de 0,9.

L'últim terme de l'equació (43) es defineix com:

- $4L^+ f_{app} Re$: Aquest terme té present les pèrdues de càrrega primàries al pas del dissipador.

On:

- El terme L^+ es calcula a partir de:

$$L^+ = \frac{L}{D_h Re}, \quad Re = \frac{\rho v D_h}{\mu}, \quad D_h = \frac{4dH}{2(d+H)} \quad (45)$$

- El terme $f_{app} Re$ es calcula a partir de:

$$f_{app} Re = \left[\left(\frac{3,44}{\sqrt{L^+}} \right)^2 + (f Re)^2 \right] \quad (46)$$

On:

$$f Re = \frac{24}{\varphi} \quad (47)$$

es defineix φ com:

$$\varphi = (1 + \epsilon)^2 \left[1 - \frac{192\epsilon}{\pi^5} \tanh\left(\frac{\pi}{2\epsilon}\right) \right] \quad (48)$$

es defineix ϵ com:

$$\epsilon = \frac{d}{H} \quad (49)$$

Amb aquests paràmetres es pot calcular la potència del ventilador segons (42).

B.5 POTÈNCIA NETA

La potència neta es defineix com:

$$P_{net} = P_{TEM} - P_{fan} \quad (50)$$

On:

- P_{TEM} : Potència màxima del TEM. S'ha obtingut a l'equació (39).
- P_{fan} : Potència del ventilador per fer moure el fluid a través del dissipador. S'ha obtingut a l'equació (42).