

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Mecànica

Títol: Estudi del comportament tèrmic d'un doble vidre hermètic per millorar-ne la seva transmitància tèrmica.

Document: Memòria i annexos

Alumne: Isaac Estarriola Camós

Tutor: Eduard Massaguer Colomer

Departament: Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Mecànica de fluids

Convocatòria (mes/any): Setembre 2024

ÍNDEX

1.	INTRODUCCIÓ	5
1.1	Antecedents	5
1.2	Objecte.....	6
1.3	Abast.....	6
2.	TRANSMITÀNCIA TÈRMICA	7
2.1	Normativa UE-EN 673.....	8
3.	DESENVOLUPAMENT DE L'ESTUDI.....	13
3.1	Parametrització	13
3.2	Metodologia.....	15
4.	TRANSMITÀNCIA TÈRMICA SEGONS CÀLCUL	18
4.1	Aire.....	18
4.2	Argó	21
4.3	Criptó	24
4.4	Xenó	27
4.5	Comparativa entre gasos	30
5.	TRANSMITÀNCIA TÈRMICA SEGONS SIMULACIÓ.....	32
5.1	Aire.....	32
5.2	Comparativa aire	35
5.3	Argó	37
5.4	Comparativa Argó	40
5.5	Criptó	41
5.6	Comparativa Criptó	44
5.7	Xenó	45
5.8	Comparativa Xenó.....	48
6.	COMPARATIVA ENTRE CÀLCUL I SIMULACIÓ	49
6.1	Aire.....	49
6.2	Argó	50
6.3	Criptó	51
6.4	Xenó	52

6.5	Comparativa general	53
7.	COSTOS	53
8.	CONCLUSIONS	54
9.	RELACIÓ DE DOCUMENTS	55
10.	BIBLIOGRAFIA	56
ANNEX A: Càlculs		57
A.1	Introducció	58
A.2	Exemple de càlculs	58
ANNEX B: Fixació de paràmetres i exemple de la simulació		61
B.1	Fixació de paràmetres	62
B.2	Exemple de simulació	64
ANNEX C: Taules suplementàries		69
C.1	Introducció	70
C.2	Taules	70
C2.1	Aire	70
C2.2	Argó	72
C2.3	Criptó	73
C2.4	Xenó	75

1. INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents

Un doble vidre hermètic, constitueix el conjunt de dos panells de vidre separats per un espai hermèticament segellat. Aquest espai, pot ser emplenat amb aire deshidratat o amb una selecció de gasos especials, com ara l'argó, el criptó i el xenó. Tot això amb l'objectiu d'optimitzar les propietats aïllants del conjunt. L'ús d'aquesta tecnologia no només redueix la transferència de calor, sinó que també ofereix beneficis addicionals com la reducció del soroll exterior, millorant així el confort interior de l'edifici.

La funció principal d'un doble vidre hermètic és millorar significativament l'eficiència energètica de l'edifici, un dels objectius més perseguits en el sector de la construcció. Aquesta millora es tradueix en un notable increment en el rendiment del sistema de calefacció i refrigeració, ja que proporciona un aïllament tèrmic molt més eficaç en comparació amb els sistemes tradicionals de vidre individual. La capa d'aire o gas entre els panells crea una barrera addicional que redueix de manera significativa les pèrdues d'energia, mantenint l'interior de l'edifici més fresc durant els mesos d'estiu i més càlid durant els mesos d'hivern. A més, aquesta tecnologia contribueix a la reducció de les emissions de gasos d'efecte hivernacle, fent de les edificacions que l'incorporen una opció més sostenible i ecològica. Per a mesurar l'aïllament tèrmic proporcionat per aquests sistemes de doble vidre, es fa servir el valor de la transmitància tèrmica "U" ($W/(m^2 \cdot K)$), el qual representa la quantitat de calor que passa a través del tancament per metre quadrat. L'avaluació d'aquest coeficient és fonamental en la determinació de la eficiència energètica de l'edifici. És aquí on la normativa europea EN673:2011 entra en joc, establint els procediments i criteris per al càlcul d'aquest coeficient en vidres i assemblatges de vidre utilitzats en la construcció.

És important destacar que els estàndards d'eficiència energètica poden variar en funció de la regió geogràfica i del tipus d'edifici. Malgrat això, es considera generalment que un valor de U per sota dels $0,5 W/(m^2 K)$ és altament eficient en termes d'aïllament tèrmic, reflectint un compromís amb la sostenibilitat i l'eficiència energètica en la construcció moderna.

1.2 Objecte

L'Objecte del projecte és estudiar com la modificació de certs paràmetres del Doble Vidre Hermètic (DVH) com l'altura de la cambra de gas, el tipus de gas que conté o el gruix d'aquesta, afecten al coeficient U i de quina manera.

Cal tenir en compte que dins la cambra d'aire es produeixen fenòmens de convecció que poden afectar significativament el coeficient U. La comprensió detallada d'aquests fenòmens i la seva relació amb els paràmetres del DVH és crucial per optimitzar el rendiment tèrmic dels panells en aplicacions constructives.

Aquest estudi vol proporcionar informació valuosa sobre com ajustar aquests elements per aconseguir un millor aïllament tèrmic en edificacions, contribuït a la sostenibilitat i al confort dels espais habitables.

1.3 Abast

Primerament es farà una introducció dels conceptes teòrics necessaris per comprendre la problemàtica que es pretén estudiar amb aquest treball, també s'analitzarà la normativa de càlcul del coeficient U en dobles vidres hermètics, per comparar posteriorment els valors teòrics que ens proporcionen les diferents formules que apareixen en aquesta amb els resultats de l'estudi.

Es durà a terme un estudi paramètric del DVH emprant eines de dinàmica de fluids computacional i termodinàmica mitjançant el software de simulació ANSYS. Aquest estudi permetrà un anàlisi detallat de les diferents variables, posteriorment, s'analitzaran les dades identificant patrons i tendències que puguin influir en el rendiment tèrmic del DVH.

Amb els resultats obtinguts s'obtindran les conclusions necessàries per poder proposar millores amb l'objectiu d'assolir els valors inferiors als que marquen els objectius europeus de $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

2. TRANSMITÀNCIA TÈRMICA

La transmitància tèrmica, representada pel coeficient U (W/m^2K), és una mesura que indica la quantitat de calor que passa a través d'un material o un conjunt de materials en un determinat temps i en determinades condicions.

Un coeficient U alt indica una alta taxa de transferència de calor, la qual cosa significa que el material té una baixa resistència tèrmica i permet un flux significatiu de calor a través d'ell. Per contra, un coeficient U baix indica una baixa taxa de transferència de calor, i això implica que el material proporciona una major resistència al pas del calor.

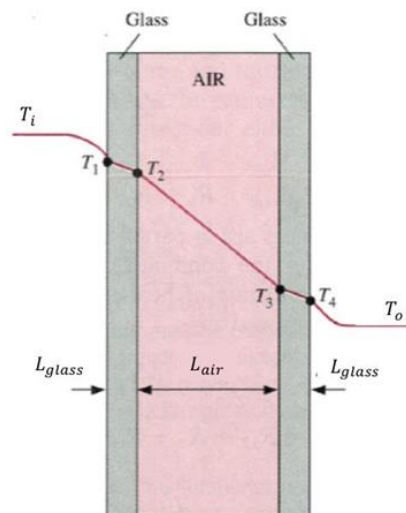


Figura 1: secció DVH amb temperatures

En un DVH, la presència d'un espai d'aire hermèticament segellat entre els dos vidres ajuda a reduir la transferència de calor per **conducció**. Això és a causa de la baixa conductivitat tèrmica de l'aire en comparació amb els vidres tal com es pot veure a la figura 1. Per tant, el DVH ofereix una millor resistència tèrmica en comparació amb un vidre simple. La **radiació**, solar o infraroja, també influeix en la calor transferida a través dels panells de vidre, per això el seu efecte ha de ser minimitzat amb el disseny adequat dels vidres i el seu revestiment per optimitzar l'aïllament tèrmic.

Per altra banda, l'aire de l'interior de la cambra pot generar corrents a causa de la diferència de temperatures, per tant, a partir d'una certa amplada de cambra la **convecció** guanya importància en el valor del coeficient U.

Podem veure les tres formes de transferència de calor a la figura 2:

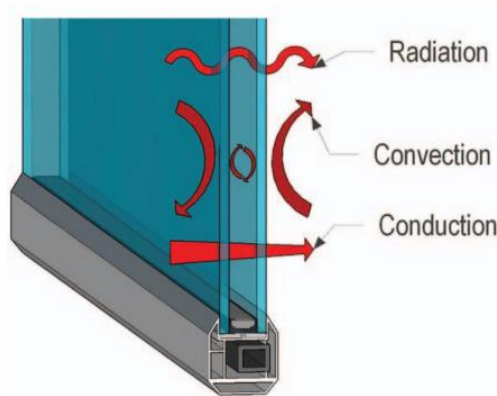


Figura 2: transferència de calor en un DVH

2.1 Normativa UE-EN 673

La normativa UNE-EN 673 és una norma europea que estableix els procediments de mesura de la transmitància tèrmica (o coeficient U) en la zona central dels panells de vidre de cares planes i paral·leles, sense tenir en compte el pont tèrmic degut als marcs. Aquesta normativa proporciona les especificacions tècniques i els requisits necessaris per garantir la comparabilitat dels resultats obtinguts en diferents laboratoris i assegurar que els materials compleixin amb els estàndards de qualitat i eficiència energètica.

Aquesta defineix el valor U amb la següent fórmula:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_t} + \frac{1}{h_i} \quad (\text{Eq.1})$$

on:

h_e i h_i són coeficients de transferència de calor externa i interna;

h_t és la conductància tèrmica total del doble panell.

$$\frac{1}{h_t} = \sum_1^N \frac{1}{h_s} + \sum_1^M d_j \cdot r_j \quad (\text{Eq.2})$$

on:

h_s és la conductància tèrmica de cada càmera de gas;

N és el número de cambres;

d_j és l'espessor de capa de material;

r_j és la resistivitat tèrmica de cada material (resistivitat vidre sodocàlcic = 1,0 m·K/W);

M és el número de capes de cada material.

$$h_{s,k} = h_{r,k} + h_{g,k} \quad (\text{Eq.3})$$

on:

$h_{s,k}$ és la transferència de calor de la cambra d'índex k ;

$h_{r,k}$ és la conductància per radiació;

$h_{g,k}$ és el valor U del gas.

La conductància per radiació h_r s'expressa de la següent forma:

$$h_{r,k} = 4\sigma \left(\frac{1}{\varepsilon_{1,k}} + \frac{1}{\varepsilon_{2,k}} - 1 \right)^{-1} T_{m,k}^3 \quad (\text{Eq.4})$$

on:

σ és la constant de Stefan-Boltzmann;

$T_{m,k}$ és la temperatura absoluta mitjana de la cambra de gas;

$\varepsilon_{1,k}$ i $\varepsilon_{2,k}$ són les emissivitats corregides de les superfícies que confinen l'espai tancat entre vidres a una temperatura $T_{m,k}$.

La conductància del gas h_g s'expressa de la següent forma:

$$h_{g,k} = N_u \frac{\lambda_k}{s_k} \quad (\text{Eq.5})$$

on:

s_k és l'espessor de la cambra d'índex k;

λ_k és la conductivitat tèrmica del gas d'índex k;

N_u és el número de Nusselt.

$$N_u = A \cdot (G_r \cdot P_r)^n \quad (\text{Eq.6})$$

on:

A és una constant;

G_r és el número de Grashof;

P_r és el número de Prandtl;

n és un exponent.

$$G_r = \frac{9,81 \text{ s}^3 \cdot \Delta T \cdot \rho^2}{T_m \cdot \mu^2} \quad (\text{Eq.7})$$

$$P_r = \frac{\mu c}{\lambda} \quad (\text{Eq.8})$$

on:

ΔT és la diferència de temperatures entre les superfícies de vidre que confinen la cambra;

ρ és la densitat;

μ és la viscositat dinàmica;

c és el calor específic;

T_m és la temperatura mitjana;

Per poder posar valors a les variables d'aquestes equacions requerim de la taula de propietats del gas a utilitzar (figura 4):

Gas	Temperatura ϑ °C	Densidad ρ kg/m ³	Viscosidad dinámica μ kg/(m·s)	Conductividad λ W/(m·K)	Calor específico c J/(kg·K)
Aire	- 10	1,326	$1,661 \times 10^{-5}$	$2,336 \times 10^{-2}$	$1,008 \times 10^3$
	0	1,277	$1,711 \times 10^{-5}$	$2,416 \times 10^{-2}$	
	10 ^a	1,232	$1,761 \times 10^{-5}$	$2,496 \times 10^{-2}$	
	20	1,189	$1,811 \times 10^{-5}$	$2,576 \times 10^{-2}$	
Argón	- 10	1,829	$2,038 \times 10^{-5}$	$1,584 \times 10^{-2}$	$0,519 \times 10^3$
	0	1,762	$2,101 \times 10^{-5}$	$1,634 \times 10^{-2}$	
	10 ^a	1,699	$2,164 \times 10^{-5}$	$1,684 \times 10^{-2}$	
	20	1,640	$2,228 \times 10^{-5}$	$1,734 \times 10^{-2}$	
Kriptón	- 10	3,832	$2,260 \times 10^{-5}$	$0,842 \times 10^{-2}$	$0,245 \times 10^3$
	0	3,690	$2,330 \times 10^{-5}$	$0,870 \times 10^{-2}$	
	10 ^a	3,560	$2,400 \times 10^{-5}$	$0,900 \times 10^{-2}$	
	20	3,430	$2,470 \times 10^{-5}$	$0,926 \times 10^{-2}$	
Xenón	-10	6,121	$2,078 \times 10^{-5}$	$0,494 \times 10^{-2}$	$0,161 \times 10^3$
	0	5,897	$2,152 \times 10^{-5}$	$0,512 \times 10^{-2}$	
	10 ^a	5,689	$2,226 \times 10^{-5}$	$0,529 \times 10^{-2}$	
	20	5,495	$2,299 \times 10^{-5}$	$0,546 \times 10^{-2}$	

Figura 4: taula de propietats del gas (UNE-EN 673)

A l'apartat 8, la normativa UNE-EN 673 ens proporciona una taula de valors normalitzats a utilitzar en tots els casos que el valor U es vulgui declarar amb fins promocionals, aquests valors són els que apareixen a la taula de la figura 5.

r	resistividad tèrmica del vidre sodocàlcico	1,0 m·K/W
ϵ	emisividad corregida para superficie de vidre sodocàlcico no recubierto y borisilicatado	0,837
ΔT	diferencia de temperaturas entre superficies de vidre de confinamiento	15 K
T_m	temperatura media de la cámara de gas	283 K
σ	constante de Stefan-Boltzmann	$5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
h_e	coeficiente de transferencia externa de calor de superficies de vidre sodocàlcico no recubierto	25 W/(m ² ·K)
h_i	coeficiente de transferencia interna de calor de superficies de vidre sodocàlcico no recubierto	7,7 W/(m ² ·K)
A	constante	0,035
n	exponente	0,38

En la tabla 1 se indican las condiciones normalizadas de contorno para las propiedades del gas a una temperatura de 10 °C (283 K).

Figura 5: taula de valors normalitzats UNE-EN 673

A l'apartat 10 de la normativa, es puntualitza la informació que ha de contenir un informe d'assaig:

- Espessor total del panell (mil·límetres);
- Espessor de cada panell de vidre (mil·límetres);
- Espessor de cada capa de material, si n'hi hagués (mil·límetres);
- Espessor de la/les cambra/es de gas (mil·límetres);
- Tipus de gas compres en la/les cambres;
- Posició del recobriment reflectant de radiació infraroja, si n'hi hagués;
- Inclinió del doble panell (angle respecte l'horitzontal);
- Qualsevol altra condició que difereixi de les condicions normalitzades de contorn.

Pel que fa als resultats, es requereix:

- Emissivitat corregida del recobriment, en cas que recobriments que modifiquin l'emissivitat;
- Coeficient de transferència interna de calor h_i , en cas de recobriments que modifiquin l'emissivitat. [W/(m² · K)];
- Conductància tèrmica total del panell, h_t [W/(m² · K)];
- Valor U del panell [W/(m² · K)];
- h_s, h_e i h_i si s'han utilitzat en el càlcul del valor U [W/(m² · K)];

3. DESENVOLUPAMENT DE L'ESTUDI

L'objectiu d'aquest estudi, tal com s'ha esmentat anteriorment, és analitzar la transmitància tèrmica d'un doble vidre hermètic i conèixer com aquesta es pot modificar canviant la geometria del panell i els gasos de la cambra.

Per la realització de l'estudi es definirà un gruix constant dels dos panells de vidre i es variarà, per cada gas estudiat, tant l'amplada de la cambra de gas com l'altura del panell, per veure l'evolució dels resultats al llarg del canvi de geometria. No es tindrà en compte ni el material del marc del panell ni l'afectació en la transferència de calor per pont tèrmic d'aquest.

Es calcularà quina és la transmitància tèrmica en cada variació de la geometria i es compararan els resultats obtinguts del càlcul segons indica la normativa UNE-EN 673 i els resultats obtinguts amb el software de simulació que ens proporciona el programa ANSYS.

3.1 Parametrització

Seguint el procediment de càlcul explicat anteriorment, es presenten els paràmetres i variables utilitzats en l'estudi.

- Materials del panell:
 - o Vidre sodocàlcic
 - o Aire
 - o Argó
 - o Xenó
 - o Criptó

- Dimensions variables del doble vidre (figura 6):

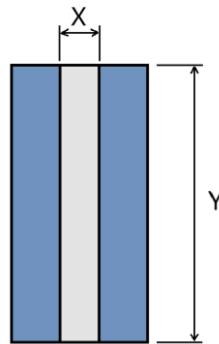


Figura 6: Dimensions variables del DVH

- X (mm): [5; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 40]
- Y (m): [0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5]

- Valors declarats en condicions normals de contorn pels càlculs segons normativa:
 - Resistivitat tèrmica del vidre sodocàlcic (r): 1,0 m·K/W
 - Emissivitat corregida per a superfície del vidre sodocàlcic: 0,873
 - Diferència de temperatura entre superfícies de confinament (ΔT): 15 K
 - Temperatura mitjana de la cambra de gas (T_m): 283 K / 10°C
 - Constant de Stefan-Boltzmann (σ): $5,67 \times 10^{-8}$ W/(m²·K)
 - Coeficient de transferència externa de calor (h_e): 25 W/(m²·K)
 - Coeficient de transferència interna de calor (h_i): 7,7 W/(m²·K)
 - Constant A: 0,035
 - Exponent n: 0,38
 - Espessor del vidre (d_j): 0,016 m

- Propietats de cada gas utilitzat (a 10^o de temperatura) :
 - Aire:
 - Densitat (ρ): 1,232 kg/m³
 - Viscositat dinàmica (μ): $1,761 \times 10^{-5}$ kg/(m·s)
 - Conductivitat (λ): $2,496 \times 10^{-2}$ W/(m·K)
 - Calor específic (c): 1008 J/(kg·K)

 - Argó:
 - Densitat (ρ): 1,699 kg/m³
 - Viscositat dinàmica (μ): $2,164 \times 10^{-5}$ kg/(m·s)

▪ Conductivitat (λ):	1,684 x 10 ⁻² W/(m·K)
▪ Calor específic (c):	519 J/(kg·K)
○ Criptó:	
▪ Densitat (ρ):	3,560 kg/m ³
▪ Viscositat dinàmica (μ):	2,400 x 10 ⁻⁵ kg/(m·s)
▪ Conductivitat (λ):	0,900 x 10 ⁻² W/(m·K)
▪ Calor específic (c):	245 J/(kg·K)
○ Xenó:	
▪ Densitat (ρ):	5,689 kg/m ³
▪ Viscositat dinàmica (μ):	2,226 x 10 ⁻⁵ kg/(m·s)
▪ Conductivitat (λ):	0,529 x 10 ⁻² W/(m·K)
▪ Calor específic (c):	161 J/(kg·K)

3.2 Metodologia

Segons estudis citats a continuació:

“Bekkouche, Sidi Mohammed El Amine & Benouaz, Tayeb & Mohamed Kamal, Cherier & Hamdani, Maamar & Yaïche, Redha & Benamrane, Noceir. (2013). *Thermal resistances of air in cavity walls and their effect upon the thermal insulation performance*. Journal homepage: www.IJEE.IEEFoundation.org.4.459–466.”

“Koshlak, H., Basok, B., & Davydenko, B. (2024). *Heat Transfer through Double-Chamber Glass Unit with Low-Emission Coating*. *Energies*, 17(5), 1100.”

La convecció a l'interior de la cambra de gas té un efecte pràcticament negligible en comparació a la radiació i la conducció quan la separació entre panells és menor a 40mm, tal com es mostra en la figura 7. Tenint en compte aquest punt, el càlcul i la simulació es faran per panells entre 5 i 40mm, fet que facilitarà l'obtenció de resultats de la simulació tal com s'explicarà més endavant.

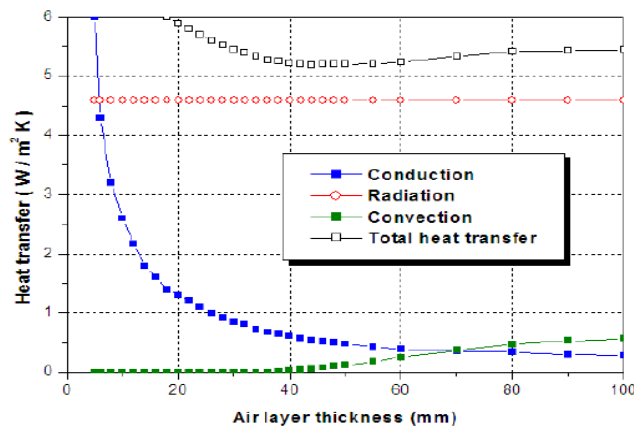


Figura 7: Transferència de calor per una cavitat d'aire tancada

Es realitzaran dues línies d'estudi que posteriorment seran comparades:

- Càlculs teòrics: Aplicant les fórmules que proporciona la normativa UNE-EN 673 s'obtinran els valors de transmitància tèrmica $[W/(m^2 \cdot K)]$ segons la variació de l'amplada de la cambra de gas interior del DVH i pels diferents gasos que conté aquesta. Es tabularan els resultats per fer possible una comparativa d'aquests.

La metodologia de càlcul utilitzada serà:

- o Obtenció del número de Prandtl i número de Grashof segons paràmetres del gas utilitzat i espessor de la cambra.
 - o Obtenció del número de Nusselt a partir dels resultats anteriors, si aquest és <1 , substituir el valor per 1 a l'utilitzar-lo en els següents càlculs.
 - o Obtenció conductància del gas (h_g) a partir dels resultats anteriors.
 - o Obtenció de la conductància per radiació (h_r).
 - o Obtenció de la transferència de calor de la cambra (h_s) a partir dels resultats anteriors.
 - o Obtenció de la conductància tèrmica total del panell (h_t) a partir dels resultats anteriors.
 - o Obtenció de la transmitància tèrmica del panell (U) a partir del valor h_t i les constants declarades h_e i h_i .
- Anàlisi de la transmitància tèrmica pels diferents casos geomètrics i de gas de la cambra interior mitjançant el software de simulació ANSYS.

En aquesta segona línia d'estudi, no només s'estudiarà com afecta la variació de l'amplada de la cambra interior, també s'analitzarà quin efecte té la variació de l'altura del panell. Aquesta no està contemplada en cap variable de les fórmules de la normativa UNE-EN 673. Es tabularan els resultats per fer possible una comparativa d'aquests.

La metodologia d'obtenció de dades serà un càlcul tèrmic estacionari, sense contemplar el moviment del fluid a l'interior de la cambra, ja que tal com s'ha mencionat anteriorment, la convecció no té afectació considerable fins als 40 mm de gruix. Aquest tipus de càlcul facilitarà l'obtenció de resultats pels diferents casos a estudiar.

L'ordre a seguir per la simulació serà el següent:

- Introduir la geometria i materials dels panells de vidre i la cambra.
- Aplicar una temperatura simulant condicions ambientals a l'exterior de 0 °C i una temperatura simulant condicions ambientals interiors de 30 °C.
- Aplicar les condicions de contorn de convecció i radiació establertes per la normativa UNE-EN 673 per cada cara del panell de vidre.
- Analitzar el comportament del panell durant el temps suficient per trobar l'instant on la temperatura interior mitjana (T_m) s'acosti als 10°C i la diferència de temperatura entre parets interiors dels vidres (ΔT) sigui de 15°C tal com es suposa en el càlcul.
- Comprovar el flux de calor en (W/m^2) que passa a través del panell en aquest mateix instant.
- Comprovar la temperatura que travessa entre la paret exterior i interior (K).
- Extreure el valor U del panell sencer en ($W/m^2 \cdot K$).

Comparativa:

Es compararan els resultats obtinguts amb els dos mètodes d'estudi per cada mateixa amplada de cambra i gas utilitzat, buscant patrons de variació del valor U.

Per una mateixa amplada de cambra es compararan els resultats de càlcul amb els resultats provinents de la simulació per les diferents altures de panell.

4. TRANSMITÀNCIA TÈRMICA SEGONS CÀLCUL

Seguint la metodologia de càlcul esmentada a l'apartat 3.2, es busquen els següents coeficients de transmitància tèrmica U . Els resultats es donen tal com indica la normativa UNE-EN 673:

Dades utilitzades que cal especificar:

- Espessor total del panell (mil·límetres);
- Espessor de cada panell de vidre (mil·límetres);
- Espessor de cada capa de material, si n'hi hagués (mil·límetres);
- Espessor de la/les cambra/es de gas (mil·límetres);
- Tipus de gas compres en la/les cambres;
- Posició del recobriments reflectant de radiació infraroja, si n'hi hagués;
- Inclinació del doble panell (angle respecte l'horitzontal);
- Qualsevol altra condició que difereixi de les condicions normalitzades de contorn.

Pel que fa als resultats, es requereix:

- Emissivitat corregida del recobriments, en cas que recobriments que modifiquin l'emissivitat;
- Coeficient de transferència interna de calor h_i , en cas de recobriments que modifiquin l'emissivitat. [W/(m² · K)];
- Conductància tèrmica total del panell, h_t [W/(m² · K)];
- Valor U del panell [W/(m² · K)];
- h_s, h_e i h_i si s'han utilitzat en el càlcul del valor U [W/(m² · K)];

4.1 Aire

Dades que comparteixen tots els casos d'aquest apartat:

- Espessor de cada panell de vidre: 16mm
- Tipus de gas comprès en la cambra: aire
- Inclinació del doble panell respecte l'horitzontal: 90°
- h_e 25 [W/(m² · K)]
- h_i 7,7 [W/(m² · K)]

1 A.

- Espessor total del panell:	37 mm
- Espessor de la cambra de gas:	5 mm
- Conductància tèrmica total del panell, h_t	9,33 [W/(m ² · K)]
- h_s	9,61 [W/(m ² · K)]
- Valor U del panell	3,60 [W/(m ² · K)]

2 A.

- Espessor total del panell:	42 mm
- Espessor de la cambra de gas:	10 mm
- Conductància tèrmica total del panell, h_t	6,52 [W/(m ² · K)]
- h_s	6,65 [W/(m ² · K)]
- Valor U del panell	3,09 [W/(m ² · K)]

3 A.

- Espessor total del panell:	47 mm
- Espessor de la cambra de gas:	15 mm
- Conductància tèrmica total del panell, h_t	9,33 [W/(m ² · K)]
- h_s	9,61 [W/(m ² · K)]
- Valor U del panell	2,86 [W/(m ² · K)]

4 A.

- Espessor total del panell:	52 mm
- Espessor de la cambra de gas:	20 mm
- Conductància tèrmica total del panell, h_t	5,45 [W/(m ² · K)]
- h_s	5,54 [W/(m ² · K)]
- Valor U del panell	2,83 [W/(m ² · K)]

5 A.

- Espessor total del panell:	57 mm
- Espessor de la cambra de gas:	25 mm
- Conductància tèrmica total del panell, h_t	5,51 [W/(m ² · K)]

- h_s 5,61 $[W/(m^2 \cdot K)]$
- Valor U del panell **2,84** $[W/(m^2 \cdot K)]$

6 A.

- Espessor total del panell: 62 mm
- Espessor de la cambra de gas: **30 mm**
- Conductància tèrmica total del panell, h_t 5,55 $[W/(m^2 \cdot K)]$
- h_s 5,65 $[W/(m^2 \cdot K)]$
- Valor U del panell **2,85** $[W/(m^2 \cdot K)]$

7 A.

- Espessor total del panell: 67 mm
- Espessor de la cambra de gas: **35 mm**
- Conductància tèrmica total del panell, h_t 5,59 $[W/(m^2 \cdot K)]$
- h_s 5,70 $[W/(m^2 \cdot K)]$
- Valor U del panell **2,86** $[W/(m^2 \cdot K)]$

8 A.

- Espessor total del panell: 72 mm
- Espessor de la cambra de gas: **40 mm**
- Conductància tèrmica total del panell, h_t 5,63 $[W/(m^2 \cdot K)]$
- h_s 5,73 $[W/(m^2 \cdot K)]$
- Valor U del panell **2,87** $[W/(m^2 \cdot K)]$

Agrupant tots els de valors de U i espessors de cambra podem veure la progressió que segueix el recull de dades al gràfic de la figura 7:

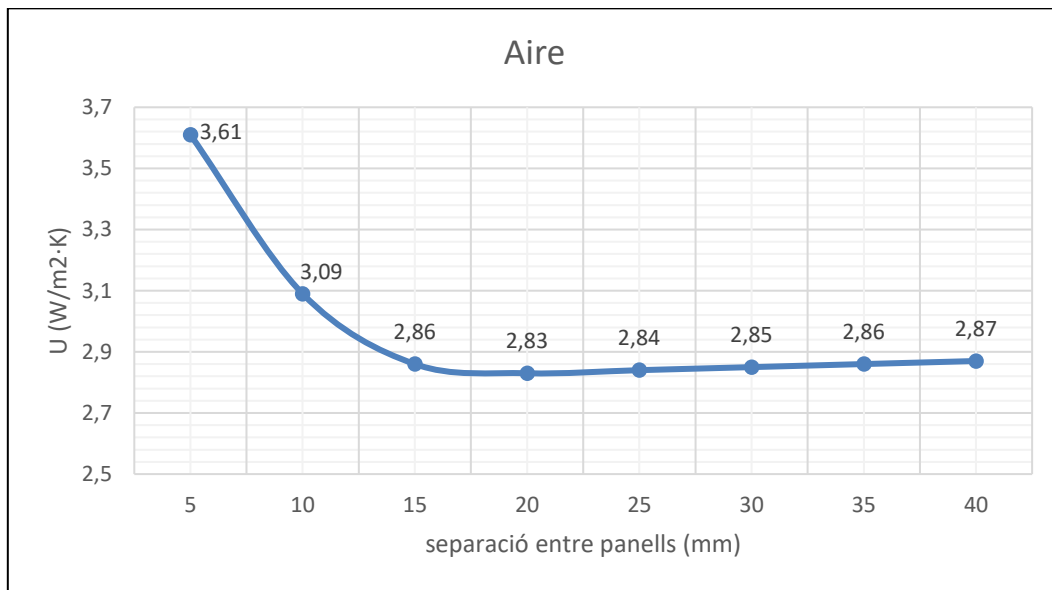


Figura 8: Taula valors U segons càlcul (aire)

A la gràfica de la figura 8, observem que, quan la separació entre panells és de 5 mm, el valor U és el més alt, amb 3,61 W/m²·K, indicant un menor aïllament tèrmic. A mesura que la separació entre panells augmenta, el valor U disminueix de manera significativa fins a 2,83 W/m²·K entre els 17,5 i els 20 mm. A partir d'aquesta separació, el valor U es manté gairebé constant, amb una lleugera tendència a augmentar fins a arribar a 2,87 W/m²·K a 40 mm de separació.

Aquest comportament indica que l'aire ofereix un aïllament tèrmic més eficient quan la separació entre panells és d'uns 20 mm, després de la qual cosa l'eficiència tendeix a estabilitzar-se o disminuir lleugerament.

4.2 Argó

Dades que comparteixen tots els casos d'aquest apartat:

- Espessor de cada panell de vidre: 16mm
- Tipus de gas comprès en la cambra: Argó
- Inclinació del doble panell respecte l'horitzontal: 90°
- h_e 25 [W/(m² · K)]
- h_i 7,7 [W/(m² · K)]

1 Ar.

- Espessor total del panell:	37 mm
- Espessor de la cambra de gas:	5 mm
- Conductància tèrmica total del panell, h_t	6,91 [W/(m ² · K)]
- h_s	7,06 [W/(m ² · K)]
- Valor U del panell	3,17 [W/(m ² · K)]

2 Ar.

- Espessor total del panell:	42 mm
- Espessor de la cambra de gas:	10 mm
- Conductància tèrmica total del panell, h_t	5,29 [W/(m ² · K)]
- h_s	5,38 [W/(m ² · K)]
- Valor U del panell	2,78 [W/(m ² · K)]

3 Ar.

- Espessor total del panell:	47 mm
- Espessor de la cambra de gas:	15 mm
- Conductància tèrmica total del panell, h_t	4,77 [W/(m ² · K)]
- h_s	4,84 [W/(m ² · K)]
- Valor U del panell	2,63 [W/(m ² · K)]

4 Ar.

- Espessor total del panell:	52 mm
- Espessor de la cambra de gas:	20 mm
- Conductància tèrmica total del panell, h_t	4,82 [W/(m ² · K)]
- h_s	4,89 [W/(m ² · K)]
- Valor U del panell	2,65 [W/(m ² · K)]

5 Ar.

- Espessor total del panell:	57 mm
- Espessor de la cambra de gas:	25 mm
- Conductància tèrmica total del panell, h_t	4,85 [W/(m ² · K)]

- h_s 4,93 $[W/(m^2 \cdot K)]$
- Valor U del panell **2,66** $[W/(m^2 \cdot K)]$

6 Ar.

- Espessor total del panell: 62 mm
- Espessor de la cambra de gas: **30 mm**
- Conductància tèrmica total del panell, h_t 4,88 $[W/(m^2 \cdot K)]$
- h_s 4,96 $[W/(m^2 \cdot K)]$
- Valor U del panell **2,67** $[W/(m^2 \cdot K)]$

7 Ar.

- Espessor total del panell: 67 mm
- Espessor de la cambra de gas: **35 mm**
- Conductància tèrmica total del panell, h_t 4,91 $[W/(m^2 \cdot K)]$
- h_s 4,99 $[W/(m^2 \cdot K)]$
- Valor U del panell **2,68** $[W/(m^2 \cdot K)]$

8 Ar.

- Espessor total del panell: 72 mm
- Espessor de la cambra de gas: **40 mm**
- Conductància tèrmica total del panell, h_t 4,93 $[W/(m^2 \cdot K)]$
- h_s 5,01 $[W/(m^2 \cdot K)]$
- Valor U del panell **2,68** $[W/(m^2 \cdot K)]$

Agrupant tots els de valors de U i espessors de cambra podem veure la progressió que segueix el recull de dades al gràfic de la figura 9:

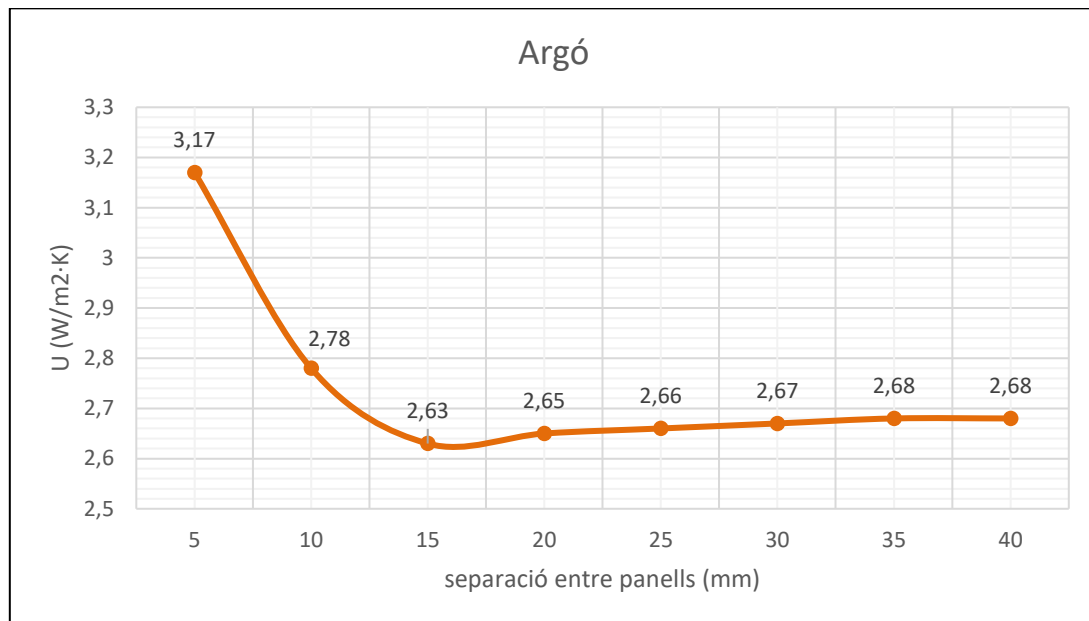


Figura 9: Taula valors U segons càlcul (argó)

Veiem a la gràfica de la figura 9 com inicialment, amb una separació de 5 mm, el valor U és de 3,17 W/m²·K, el que indica una menor capacitat d'aïllament tèrmic. A mesura que augmenta la separació entre panells, el valor U disminueix significativament fins a arribar a 2,63 W/m²·K a 15 mm, on es troba el punt més baix de la gràfica, representant el millor aïllament tèrmic.

A partir dels 15 mm, el valor U mostra una lleugera tendència a augmentar, estabilitzant-se al voltant dels 2,68 W/m²·K a partir de 35 mm de separació. Això suggereix que una separació entre panells d'uns 15 mm és òptima per maximitzar l'aïllament tèrmic amb argó, mentre que increments addicionals en la separació no milloren significativament el rendiment tèrmic i poden fins i tot reduir-lo lleugerament.

4.3 Criptó

Dades que comparteixen tots els casos d'aquest apartat:

- Espessor de cada panell de vidre: 16mm
- Tipus de gas comprès en la cambra: Criptó
- Inclinator del doble panell respecte l'horitzontal: 90°
- h_e 25 [W/(m² · K)]
- h_i 7,7 [W/(m² · K)]

1 Cr.

- Espessor total del panell:	37 mm
- Espessor de la cambra de gas:	5 mm
- Conductància tèrmica total del panell, h_t	5,40 [W/(m ² · K)]
- h_s	5,50 [W/(m ² · K)]
- Valor U del panell	2,81 [W/(m ² · K)]

2 Cr.

- Espessor total del panell:	42 mm
- Espessor de la cambra de gas:	10 mm
- Conductància tèrmica total del panell, h_t	4,56 [W/(m ² · K)]
- h_s	4,63 [W/(m ² · K)]
- Valor U del panell	2,57 [W/(m ² · K)]

3 Cr.

- Espessor total del panell:	47 mm
- Espessor de la cambra de gas:	15 mm
- Conductància tèrmica total del panell, h_t	4,61 [W/(m ² · K)]
- h_s	4,68 [W/(m ² · K)]
- Valor U del panell	2,58 [W/(m ² · K)]

4 Ar.

- Espessor total del panell:	52 mm
- Espessor de la cambra de gas:	20 mm
- Conductància tèrmica total del panell, h_t	4,65 [W/(m ² · K)]
- h_s	4,72 [W/(m ² · K)]
- Valor U del panell	2,60 [W/(m ² · K)]

5 Ar.

- Espessor total del panell:	57 mm
- Espessor de la cambra de gas:	25 mm
- Conductància tèrmica total del panell, h_t	4,68 [W/(m ² · K)]

- h_s	4,76	$[W/(m^2 \cdot K)]$
- Valor U del panell	2,61	$[W/(m^2 \cdot K)]$

6 Ar.

- Espessor total del panell:	62 mm	
- Espessor de la cambra de gas:	30 mm	
- Conductància tèrmica total del panell, h_t	4,71	$[W/(m^2 \cdot K)]$
- h_s	4,78	$[W/(m^2 \cdot K)]$
- Valor U del panell	2,61	$[W/(m^2 \cdot K)]$

7 Ar.

- Espessor total del panell:	67 mm	
- Espessor de la cambra de gas:	35 mm	
- Conductància tèrmica total del panell, h_t	4,73	$[W/(m^2 \cdot K)]$
- h_s	4,81	$[W/(m^2 \cdot K)]$
- Valor U del panell	2,62	$[W/(m^2 \cdot K)]$

8 Ar.

- Espessor total del panell:	72 mm	
- Espessor de la cambra de gas:	40 mm	
- Conductància tèrmica total del panell, h_t	4,75	$[W/(m^2 \cdot K)]$
- h_s	4,83	$[W/(m^2 \cdot K)]$
- Valor U del panell	2,63	$[W/(m^2 \cdot K)]$

Agrupant tots els de valors de U i espessors de cambra podem veure la progressió que segueix el recull de dades al gràfic de la figura 10:

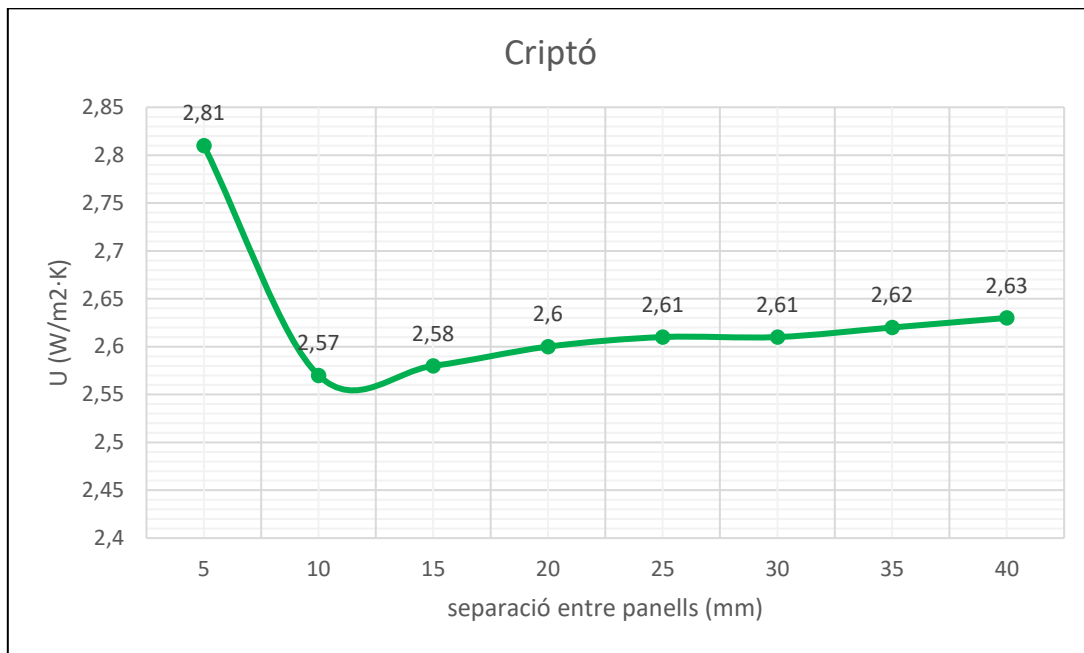


Figura 10: Taula valors U segons càlcul (criptó)

Tal com podem veure a la gràfica de la figura 9, al començament, amb una separació de 5 mm, el valor U és màxim, de 2,81 W/m²·K. A mesura que la separació augmenta fins a 10 mm, es produeix una notable disminució del valor U, que baixa fins a 2,57 W/m²·K, assolint així el valor mínim entre els 10 i els 12,5 mm.

A partir dels 12,5 mm de separació, el valor U comença a augmentar de manera gradual. Per exemple, a 15 mm, el valor U és de 2,58 W/m²·K, i continua incrementant-se lleugerament fins a arribar als 2,6 W/m²·K a 20 mm. Aquesta lleugera tendència ascendent es manté arribant als 2,63 W/m²·K als 40 mm de separació.

4.4 Xenó

Dades que comparteixen tots els casos d'aquest apartat:

- Espessor de cada panell de vidre: 16mm
- Tipus de gas comprès en la cambra: Xenó
- Inclinació del doble panell respecte l'horitzontal: 90°
- h_e 25 [W/(m² · K)]
- h_i 7,7 [W/(m² · K)]

1 Xe.

- Espessor total del panell:	37 mm
- Espessor de la cambra de gas:	5 mm
- Conductància tèrmica total del panell, h_t	4,68 [W/(m ² · K)]
- h_s	4,75 [W/(m ² · K)]
- Valor U del panell	2,60 [W/(m ² · K)]

2 Xe.

- Espessor total del panell:	42 mm
- Espessor de la cambra de gas:	10 mm
- Conductància tèrmica total del panell, h_t	4,47 [W/(m ² · K)]
- h_s	4,54 [W/(m ² · K)]
- Valor U del panell	2,54 [W/(m ² · K)]

3 Xe.

- Espessor total del panell:	47 mm
- Espessor de la cambra de gas:	15 mm
- Conductància tèrmica total del panell, h_t	4,52 [W/(m ² · K)]
- h_s	4,58 [W/(m ² · K)]
- Valor U del panell	2,55 [W/(m ² · K)]

4 Xe.

- Espessor total del panell:	52 mm
- Espessor de la cambra de gas:	20 mm
- Conductància tèrmica total del panell, h_t	4,55 [W/(m ² · K)]
- h_s	4,62 [W/(m ² · K)]
- Valor U del panell	2,56 [W/(m ² · K)]

5 Xe.

- Espessor total del panell:	57 mm
- Espessor de la cambra de gas:	25 mm
- Conductància tèrmica total del panell, h_t	4,58 [W/(m ² · K)]

- h_s 4,65 $[W/(m^2 \cdot K)]$
- Valor U del panell **2,57** $[W/(m^2 \cdot K)]$

6 Xe.

- Espessor total del panell: 62 mm
- Espessor de la cambra de gas: **30 mm**
- Conductància tèrmica total del panell, h_t 4,61 $[W/(m^2 \cdot K)]$
- h_s 4,68 $[W/(m^2 \cdot K)]$
- Valor U del panell **2,58** $[W/(m^2 \cdot K)]$

7 Xe.

- Espessor total del panell: 67 mm
- Espessor de la cambra de gas: **35 mm**
- Conductància tèrmica total del panell, h_t 4,63 $[W/(m^2 \cdot K)]$
- h_s 4,70 $[W/(m^2 \cdot K)]$
- Valor U del panell **2,59** $[W/(m^2 \cdot K)]$

8 Xe.

- Espessor total del panell: 72 mm
- Espessor de la cambra de gas: **40 mm**
- Conductància tèrmica total del panell, h_t 4,65 $[W/(m^2 \cdot K)]$
- h_s 4,72 $[W/(m^2 \cdot K)]$
- Valor U del panell **2,59** $[W/(m^2 \cdot K)]$
-

Agrupant tots els de valors de U i espessors de cambra podem veure la progressió que segueix el recull de dades al gràfic de la figura 11:

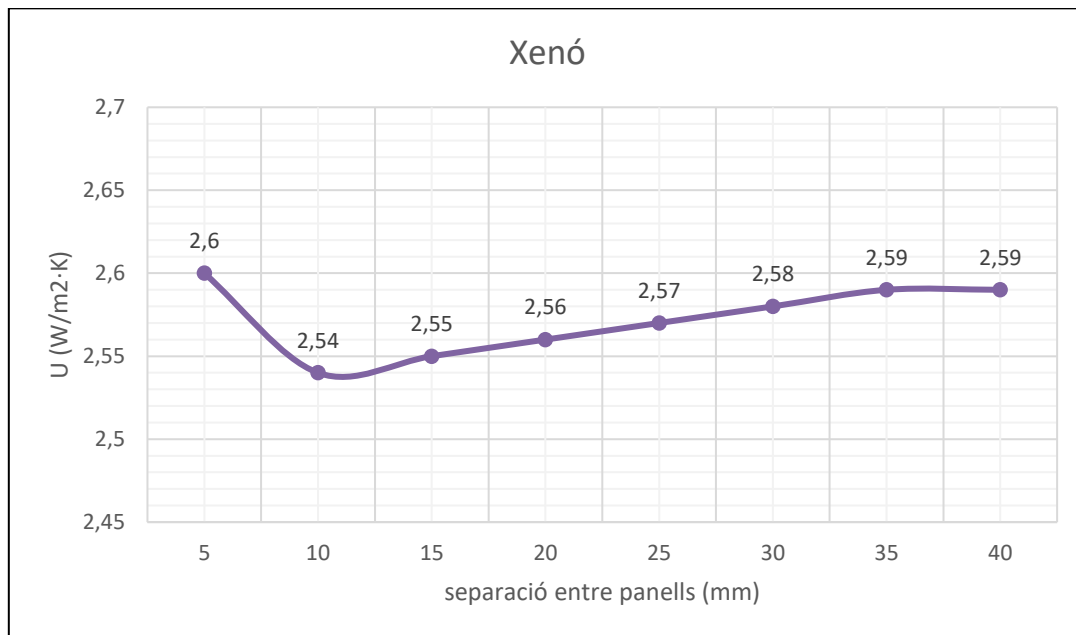


Figura 11: Taula valors U segons càlcul (xenó)

La gràfica de la figura 11 ens ensenya com a l'inici, amb una separació de 5 mm, el valor U és de 2,6 W/m²·K. A mesura que la separació augmenta a 10 mm, es produeix una disminució del valor U, que arriba a un mínim de 2,54 W/m²·K entre els 10 i els 12 mm. Després d'aquest punt, el valor U comença a augmentar de manera gradual.

A partir dels 15 mm de separació, el valor U segueix una tendència ascendent, i torna als 2,6W/m² al llarg dels pròxims 35 mm. Podem veure com la transmitància tèrmica és molt constant independentment de la separació entre panells, mantenint-se entre uns 2,5 i 2,6 W/m²·K al llarg de tota la gràfica.

4.5 Comparativa entre gasos

Ajuntant totes les dades recopilades en els quatre apartats anteriors, es pot obtenir el gràfic de línies presentat en la figura 12. En aquesta figura, es pot observar de manera detallada la relació que existeix entre els valors de U en funció de l'amplada de la cambra i del tipus de gas utilitzat en aquesta.

Aquesta representació gràfica permet una comprensió més profunda dels patrons i comportaments dels valors de U.

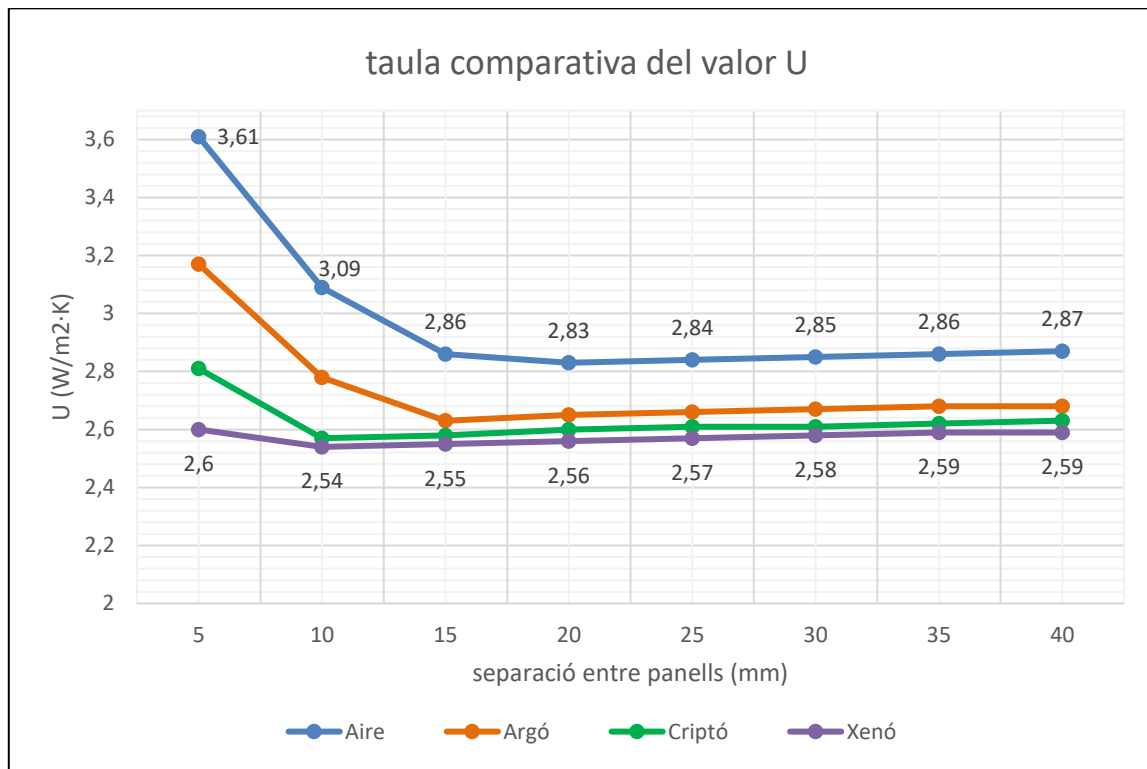


Figura 12: Taula comparativa valors U segons càlcul (xenó)

La gràfica compara els valors U ($W/m^2 \cdot K$) en funció de la separació entre panells per quatre gasos diferents: Aire, Argó, Criptó i Xenó. A través de l'anàlisi, es poden observar diferències significatives en l'aïllament tèrmic proporcionat per cada gas, així com les seves variacions en funció de la distància entre els panells.

En primer lloc, l'**Aire** presenta el valor U més elevat a 5 mm de separació, amb $3,61 W/m^2 \cdot K$, indicant que és el gas amb el pitjor aïllament tèrmic en aquest escenari inicial. A mesura que la separació augmenta, el valor U de l'Aire disminueix notablement fins als 20 mm, on s'estabilitza al voltant de $2,83 W/m^2 \cdot K$, mantenint una lleugera tendència a l'increment a partir d'aquesta distància.

En comparació, l'**Argó** mostra una reducció inicial menys pronunciada en el valor U, començant en $3,17 W/m^2 \cdot K$ a 5 mm de separació. Aquest valor disminueix progressivament fins al voltant de $2,6 W/m^2 \cdot K$ entre els 15 i 20 mm de separació, mantenint-se relativament constant amb una lleugera tendència a l'increment fins als 40 mm. Encara que ofereix un millor aïllament que l'Aire, els seus valors U són més elevats que els del Criptó i el Xenó.

Els gasos **Criptó** i **Xenó** mostren una capacitat d'aïllament tèrmic superior, amb valors U més baixos i estables. El Criptó inicia amb un valor de 2,81 W/m²·K per a 5 mm de separació i el Xenó amb 2,60 W/m²·K. Ambdós gasos mantenen petites fluctuacions, però els seus valors es mantenen per sota de 2,65 W/m²·K a partir dels 10 mm de separació entre els panells. Aquestes característiques fan que el Criptó i el Xenó siguin opcions preferents per a maximitzar l'aïllament tèrmic, especialment en aplicacions on la distància entre els panells varia.

En resum, el Xenó ofereix el millor aïllament tèrmic seguit pel Criptó, mentre que l'Argó i especialment l'Aire presenten rendiments inferiors, amb l'Aire sent el menys efectiu a mesura que augmenta la separació entre panells.

5. TRANSMITÀNCIA TÈRMICA SEGONS SIMULACIÓ

Seguint la metodologia de càlcul esmentada a l'apartat 3.2, es busquen els següents coeficients de transmitància tèrmica U. Els resultats es donen en forma de gràfiques segons l'altura del panell i el gas utilitzat dins la cambra.

5.1 Aire

- Altura del panell: 0,5 m:

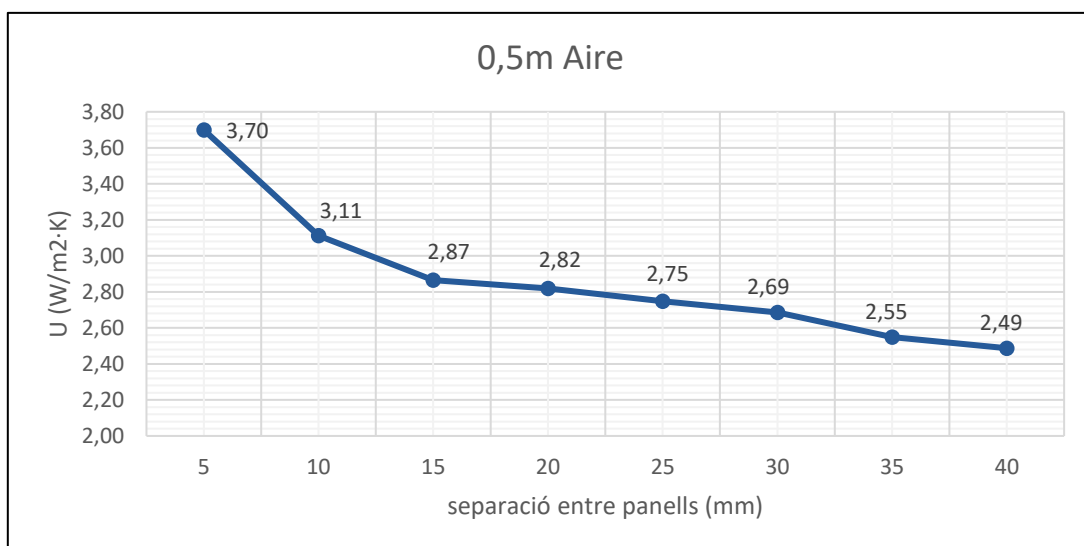


Figura 13: Taula valors U segons simulació (0,5 Aire)

A la gràfica de la figura 13, s'observa una tendència clarament decreixent a mesura que la separació entre els panells augmenta. Inicialment, quan la separació entre panells és de 5 mm, el valor de U és elevat, al voltant de $3,71 \text{ W/m}^2\text{K}$ és a dir, un menor aïllament tèrmic. A mesura que la separació augmenta, el coeficient U disminueix significativament, arribant a un valor de $2,49 \text{ W/m}^2\text{K}$ per una separació de 40 mm. Aquest descens és més marcat en la primera etapa, entre 5 mm i 15 mm de separació, on la reducció en el valor de U és més pronunciada.

A partir de 15 mm de separació, la disminució en U continua, però de manera menys pronunciada, indicant que, a partir d'un cert punt, augmentar la separació entre els panells té un efecte menor en la millora de l'aïllament tèrmic.

- Altura del panell: 1 m:

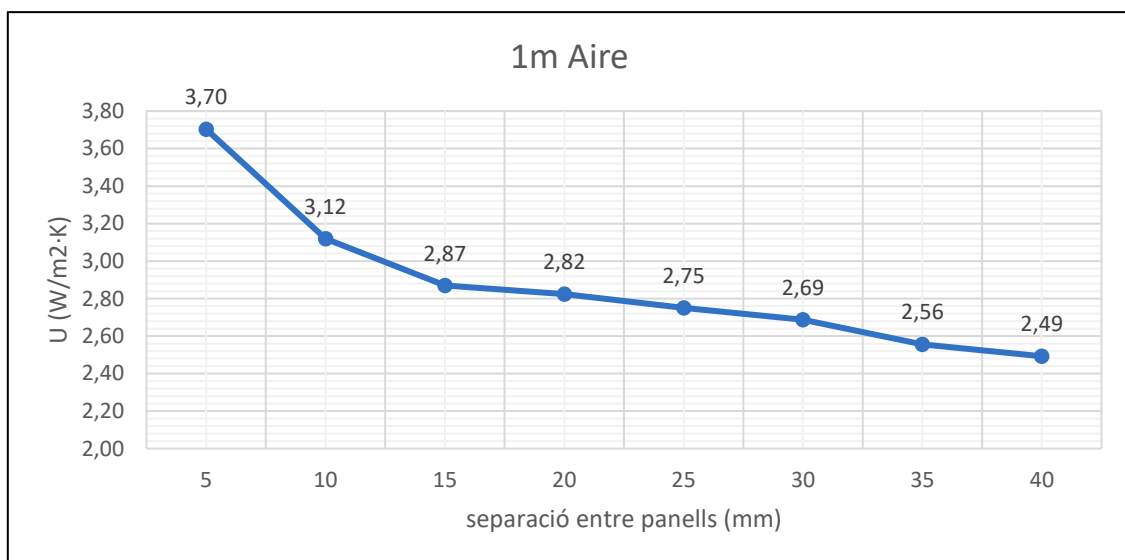


Figura 14: Taula valors U segons simulació (0,5 Aire)

Tal com podem veure a la gràfica de la figura 14, els valors són similars als de la gràfica de la figura 12, corresponents a un DVH de 0,5m d'altura. En el cas d'1m, veiem com inicialment, hi ha una forta disminució del valor U, passant de $3,70 \text{ W/m}^2\text{K}$ amb 5 mm d'espessor a $2,87 \text{ W/m}^2\text{K}$ amb 15 mm. La disminució continua però a un ritme més lent a mesura que augmenta la separació, arribant a un valor U de $2,49 \text{ W/m}^2\text{K}$ als 50 mm.

- Altura del panell: 1,5 m:

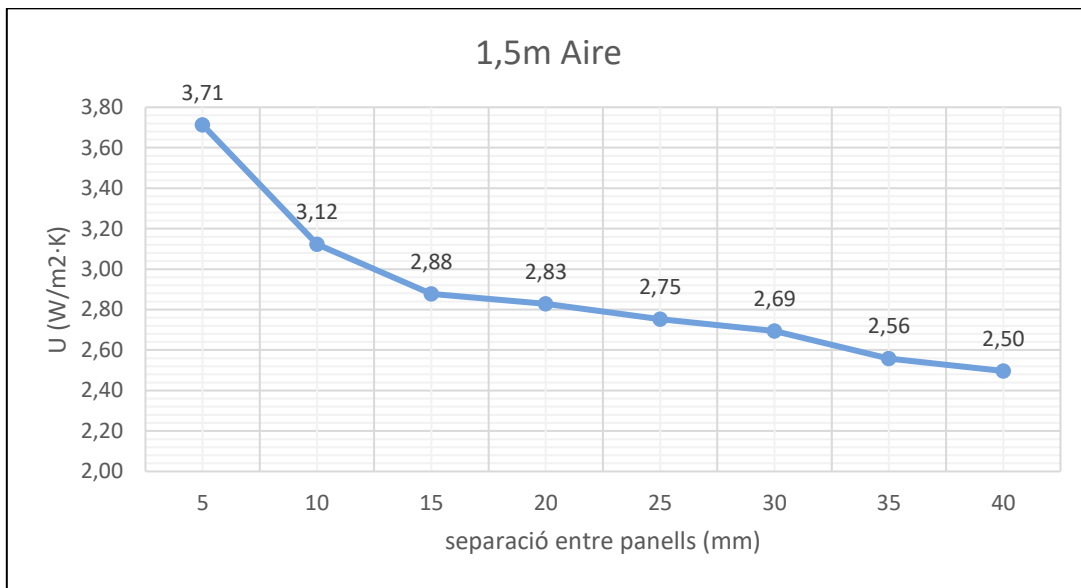


Figura 15: Taula valors U segons simulació (0,5 Aire)

En el cas d'1,5m, veiem a la figura 15 que també hi ha una forta disminució del valor U, passant de 3,71 W/m²·K amb 5 mm d'espessor a 2,88 W/m²·K amb 15 mm. La disminució continua però a un ritme més lent a mesura que augmenta la separació, arribant també a un valor U de 2,50 W/m²·K als 50 mm.

- Altura del panell: 2 m:

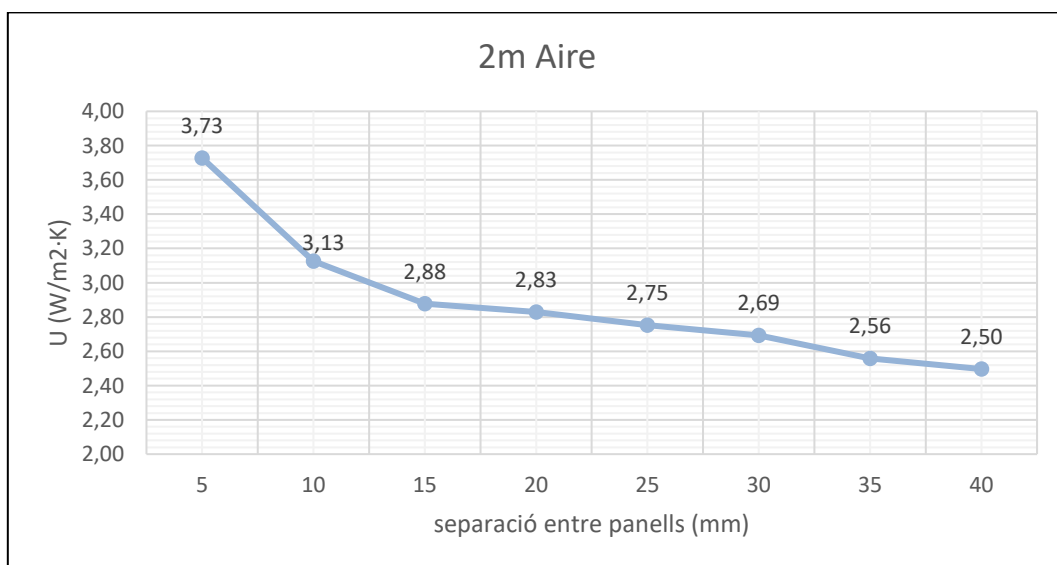


Figura 16: Taula valors U segons simulació (0,5 Aire)

A la figura 16 veiem que també hi ha una forta disminució del valor U, passant de 3,73 W/m²·K amb 5 mm d'espessor de cambra a 2,88 W/m²·K amb 15 mm. La disminució del valor de U a partir dels 15mm és molt similar als casos anteriors, continuant a mesura que augmenta la separació, arribant a un valor U de 2,5 W/m²·K als 40 mm.

- Altura del panell: 2,5 m:

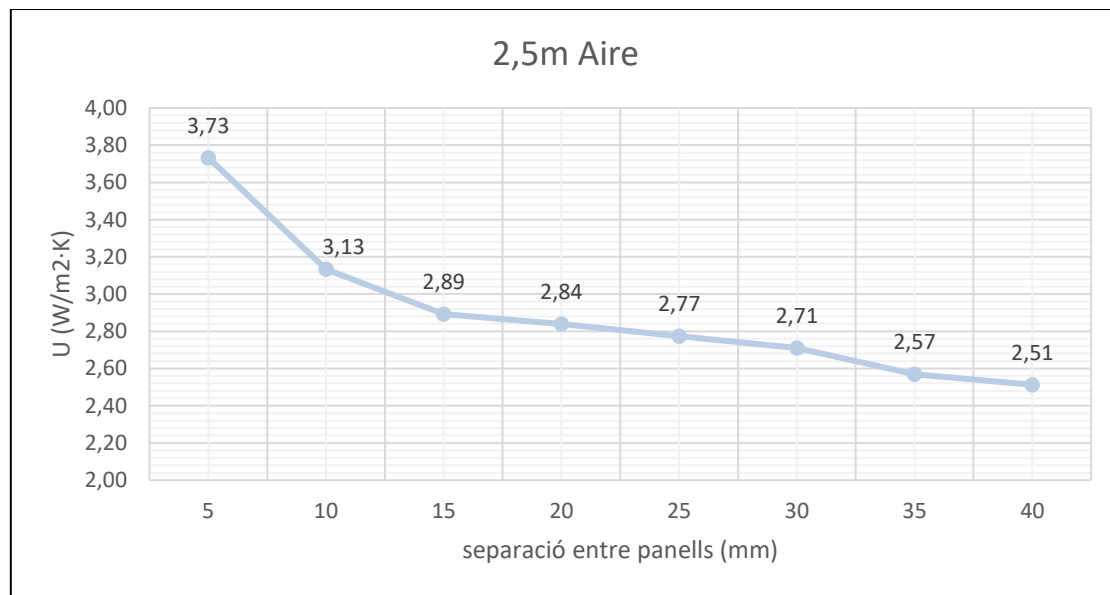


Figura 17: Taula valors U segons simulació (0,5 Aire)

Finalment, veiem a la gràfica de la figura 17 una tendència molt similar a la resta de casos, partint de 3,73 W/m²·K amb 5 mm d'espessor i baixant fins els a 2,89 W/m²·K amb 15 mm. La disminució a partir d'aquest punt continua a un ritme més lent a mesura que augmenta la separació, arribant també a un valor U de 2,51 W/m²·K als 40 mm.

5.2 Comparativa aire

A continuació es presenta la gràfica de la figura 18, que agrupa els 5 casos estudiats amb gas aire dins la cambra podent així fer una comparativa més visual dels resultats obtinguts i analitzar el que implica l'augment d'altura del panell de vidre.

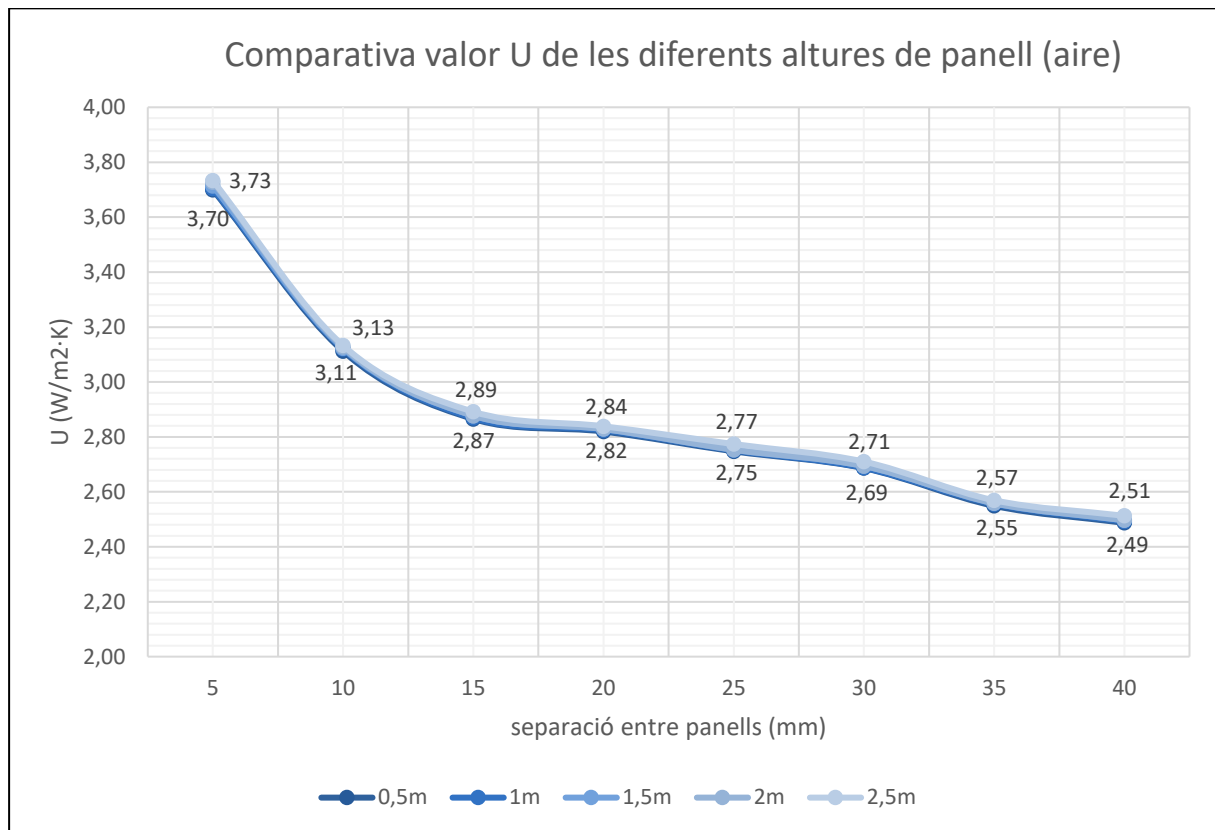


Figura 18: Taula comparativa valors U segons simulació (Aire)

Com podem veure, els valors de U dels panells són molt similars al llarg de totes les amplades de cambra de gas. Partint de valors entre 3,70 i 3,73 $W/m^2 \cdot K$ per una amplada de 5mm.

Seguidament, les corbes descendeixen considerablement fins a estabilitzar-se entre els 15 i els 20mm de separació entre panells, en valors compresos entre els 2,89 i 2,87 $W/m^2 \cdot K$.

Finalment, veiem com a partir dels 20mm d'amplada de cambra pràcticament van totes les línies sobre els mateixos punts, arribant a un valor d'entre 2,49 i 2,51 per una amplada de cambra de 40mm.

Analitzant la poca desviació de resultats podem comprovar que no apareix cap signe que indiqui l'afectació de l'altura de cambra en el valor U quan el panell conté aire dins la cambra de gas.

5.3 Argó

- Altura del panell: 0,5 m:

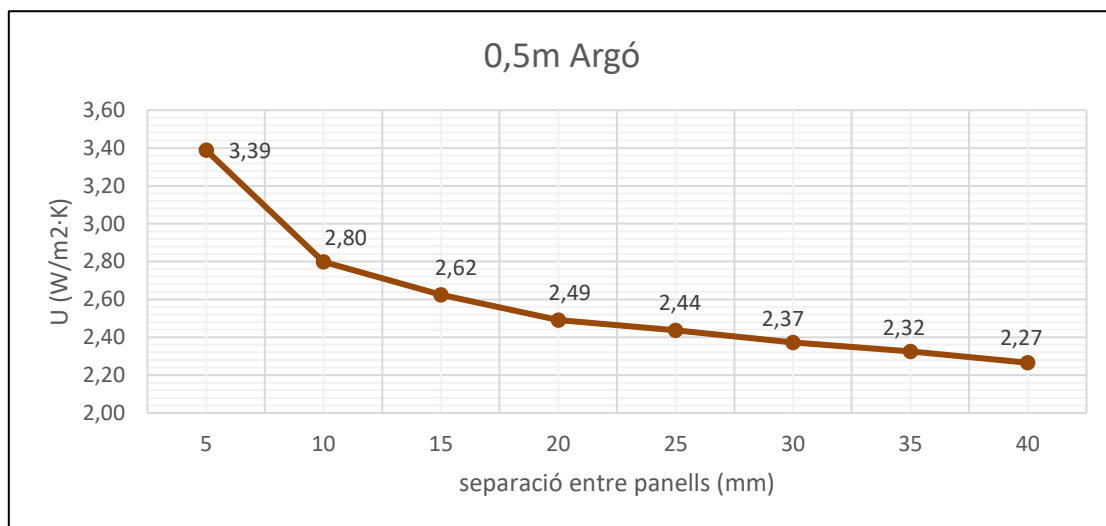


Figura 19: Taula valors U segons simulació (0,5 Argó)

A la gràfica de la figura 19 corresponent a 0,5 m d'altura de panell amb argó com a gas dins la cambra, s'observa una tendència similar a la de l'aire, clarament decreixent a mesura que la separació entre els panells augmenta des de 5 mm fins a 40 mm.

Inicialment, quan la separació entre panells és de 5 mm, el valor de U és elevat, de 3,39 W/m²K. A mesura que la separació augmenta, el coeficient U disminueix significativament, sobretot els primers 15mm de separació.

Cal destacar que la diferència de U entre els 5mm i els 15mm és de 0,77 W/m²K mentre que a partir dels 15mm fins als 40mm la disminució del valor U és més suau i constant, arribant als 2,27 W/m²K i disminuint tant sols 0,35 W/m²K al llarg de 35mm.

- Altura del panell: 1 m:

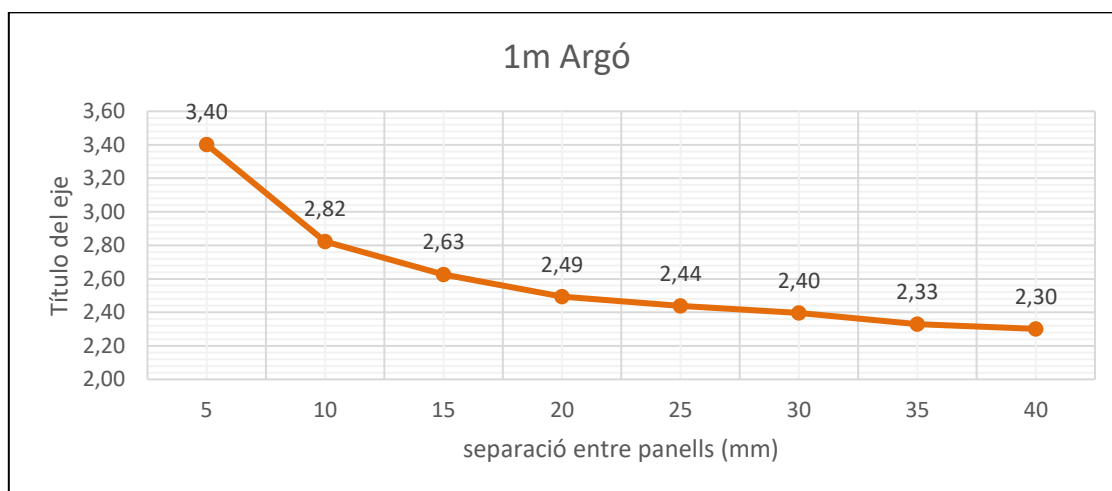


Figura 20: Taula valors U segons simulació (1 Argó)

Tal com podem veure a la gràfica de la figura 20, els valors són pràcticament els mateixos que els de la gràfica de la figura 18. Veiem com tan sols varia alguna centèsima del valor de U al llarg de la corba.

- Altura del panell: 1,5 m:

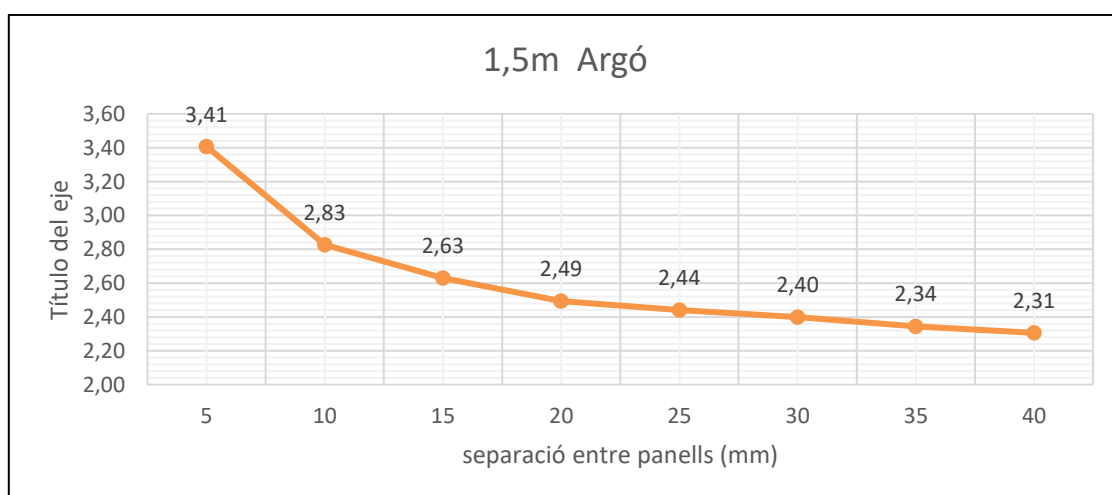


Figura 21: Taula valors U segons simulació (1,5 Argó)

En el cas d'1,5 m, veiem a la figura 20 que també hi ha una gran semblança amb les dues gràfiques anteriors corresponents als 0,5m i 1m d'altura de panell. Disminuint considerablement el valor de U durant els primers 15mm i establint-se en una disminució més suau fins arribar als 2,31 W/m²K per una amplada de cambra de 40mm.

- Altura del panell: 2 m:

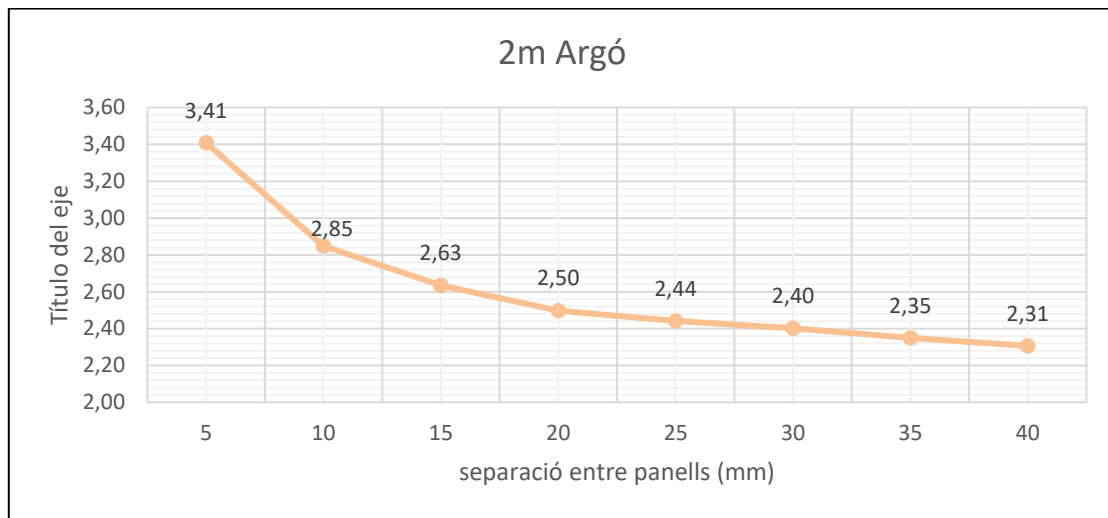


Figura 22: Taula valors U segons simulació (2 Argó)

A la figura 22 veiem com el gràfic de 2 m d'altura de panell també segueix amb una disminució del valor U similar a les anteriors, passant de 3,41 W/m²·K amb 5 mm d'espessor de cambra a 2,63 W/m²·K amb 15 mm. La disminució a partir dels 15mm és un ritme més lent a mesura que augmenta la separació, arribant a un valor U de 2,31 W/m²·K als 40 mm.

- Altura del panell: 2,5 m:

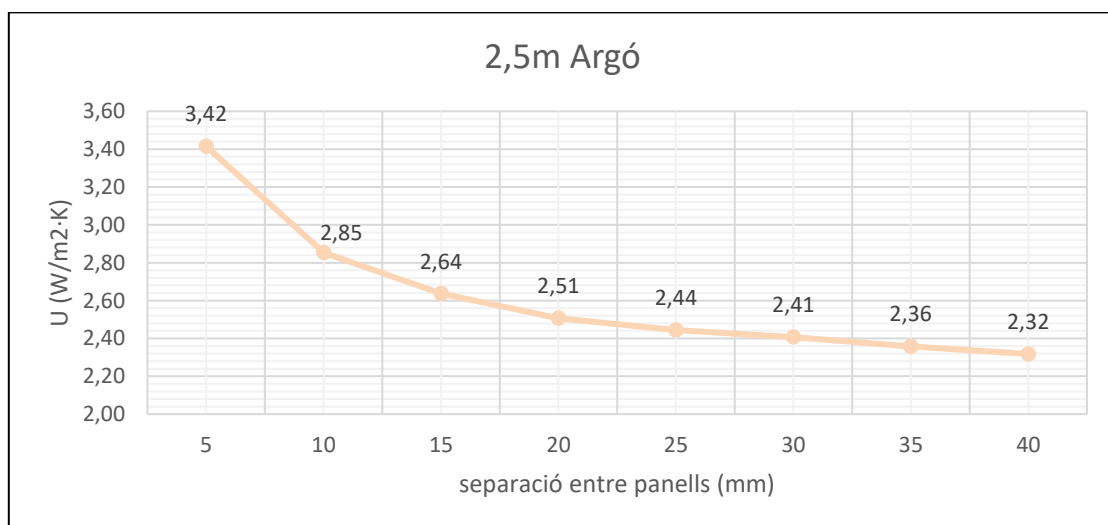


Figura 23: Taula valors U segons simulació (2,5 Argó)

Finalment, veiem la disminució altre cop similar del valor de U a la gràfica de la figura 23, passant de $3,42\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ amb 5 mm d'espessor a $2,64\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ amb 15 mm. La disminució a partir d'aquest punt és molt semblant a la resta de casos, continuant però a un ritme més lent a mesura que augmenta la separació, arribant també a un valor U de $2,32\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ als 40 mm.

5.4 Comparativa Argó

Agrupant els 5 casos estudiats amb gas argó dins la cambra del panell obtenim la gràfica de la figura 24, analitzada a continuació.

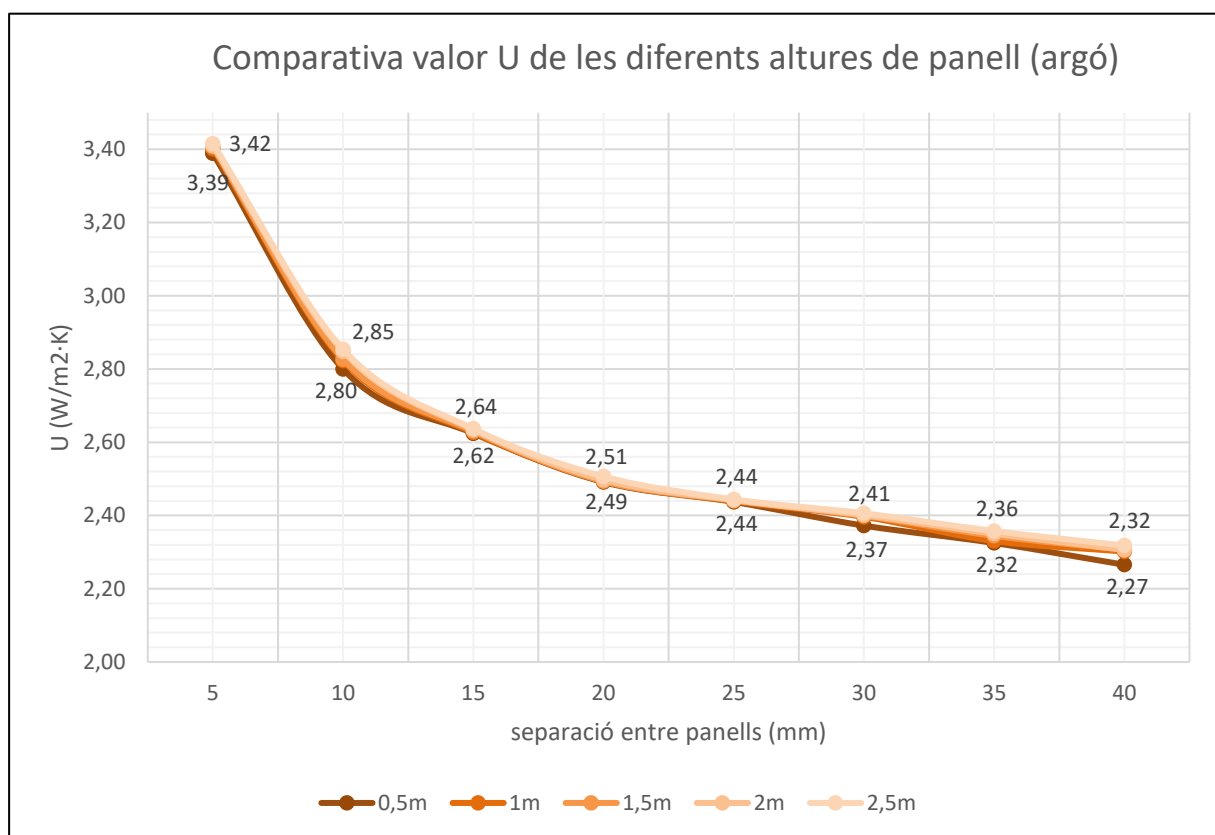


Figura 24: Taula comparativa valors U segons simulació (Argó)

Com podem veure, els valors de U dels panells són molt similars al llarg de totes les amplades de cambra de gas argó. Partint de valors entre $3,39$ i $3,42\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ per una amplada de 5mm.

Seguidament, les corbes descendeixen considerablement fins a disminuir el pendent de decreixement entre els 15 i 20mm de separació entre panells, en valors compresos entre els $2,49$ i $2,51\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

Finalment, veiem com a partir dels 20mm d'amplada de cambra totes les línies descendeixen amb valors similars, arribant entre 2,27 i 2,32 per una amplada de cambra de 40mm.

Analitzant la poca desviació de resultats podem comprovar que no apareix cap signe que indiqui l'afectació de l'altura de cambra en el valor U quan el panell conté argó dins la cambra de gas.

5.5 Criptó

- Altura del panell: 0,5 m:

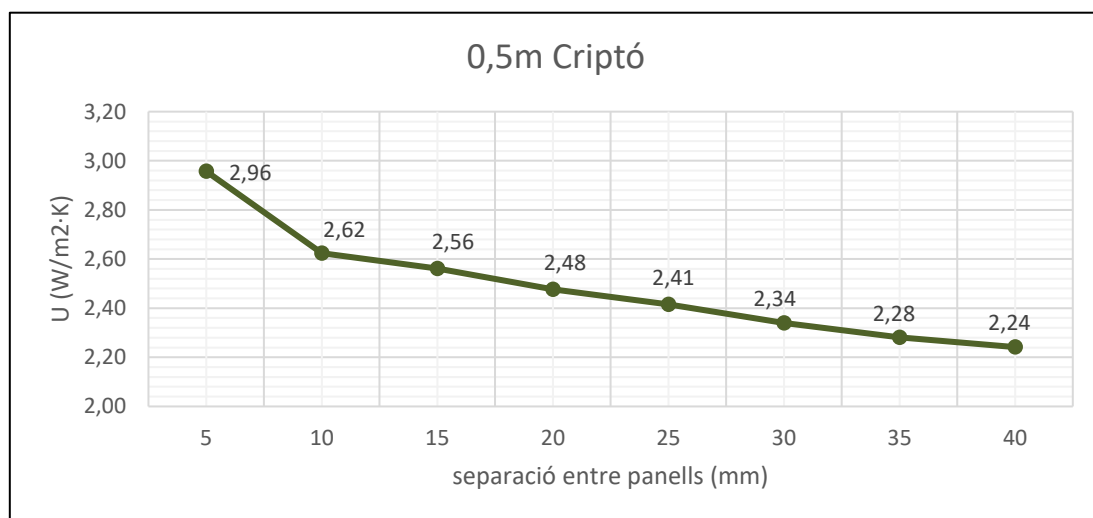


Figura 25: Taula valors U segons simulació (0,5 Criptó)

A la gràfica de la figura 25 trobem el gràfic corresponent a 0,5m d'altura de panell amb criptó com a gas atrapat entre panells, s'observa una tendència general similar a la de l'aire i l'argó, clarament decreixent a mesura que la separació entre els panells augmenta des de 5 mm fins a 40 mm.

El valor inicial per 5mm d'espessor de cambra és de 2,96mm, en aquest cas, veiem com el canvi entre els 5mm i els 10mm d'espessor és el més gran, de 0,34 W/m²·K, mentre que a partir dels 10mm el decreixement és força regular fins arribar als 2,24 W/m²·K finals.

- Altura del panell: 1 m:

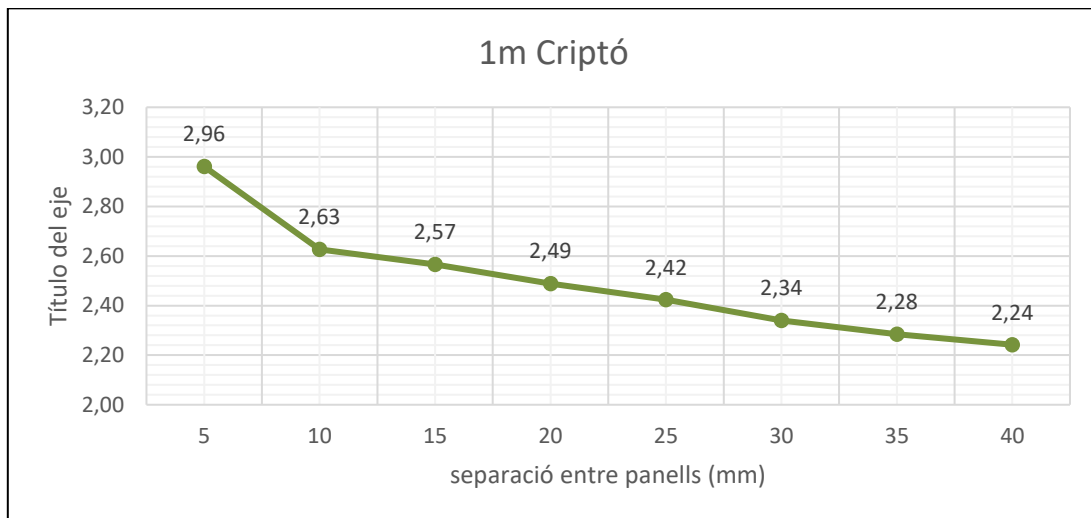


Figura 26: Taula valors U segons simulació (1 Criptó)

Tal com podem veure a la gràfica de la figura 26, els valors són pràcticament els mateixos que els de la gràfica de la figura 25. Podem observar com tan sols varia alguna centèsima del valor de U al llarg de la corba.

- Altura del panell: 1,5 m:

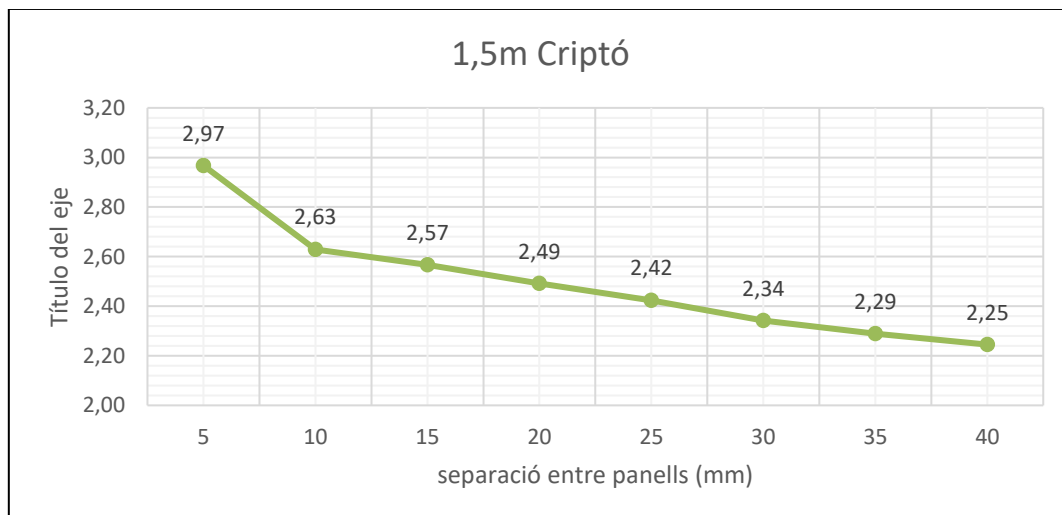


Figura 27: Taula valors U segons simulació (1,5 Criptó)

En el cas d'1,5m, veiem a la figura 27 que també hi ha una gran semblança amb les dues gràfiques anteriors corresponents als 0,5m i 1m d'altura de panell augmentant tan sols una centèsima en algun dels punts.

- Altura del panell: 2 m:

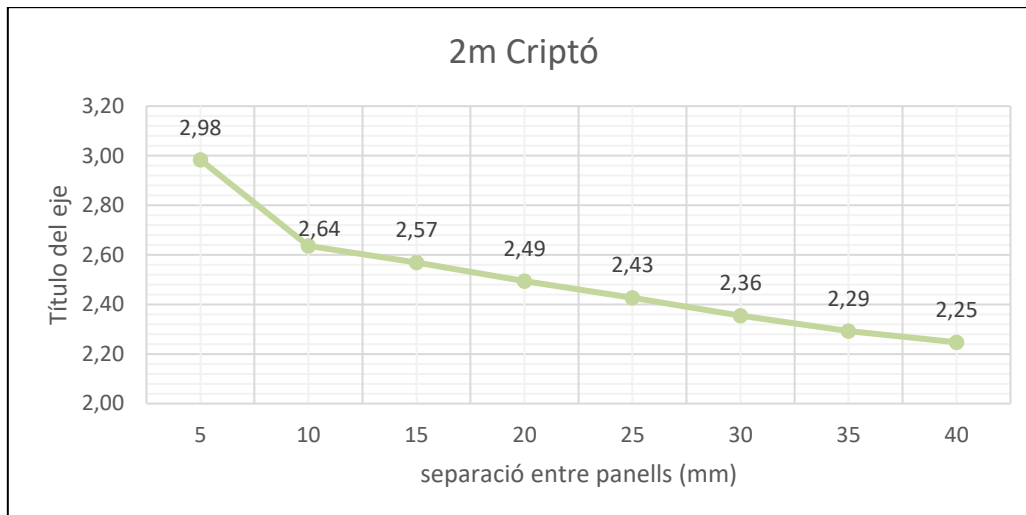


Figura 28: Taula valors U segons simulació (2 Criptó)

A la figura 28 trobem un primer canvi destacable, veiem novament com el primer valor parteix dels 2,98 W/m²·K augmentant dues centèsimes respecte la gràfica anterior. La corba a partir dels 10mm és molt igual als casos anteriors, arribant a un valor U de 2,25 W/m²·K als 40 mm.

- Altura del panell: 2,5 m:

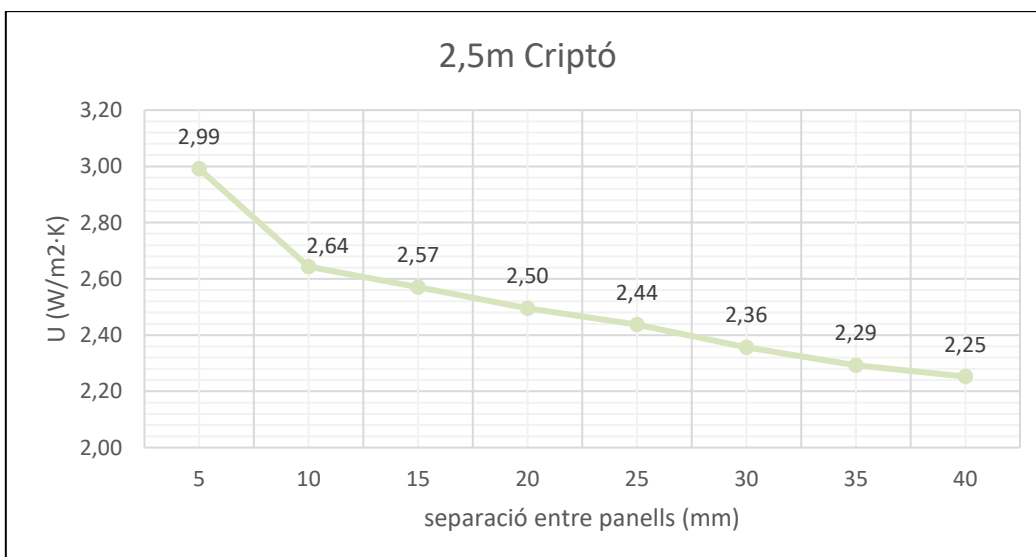


Figura 29: Taula valors U segons simulació (2,5 Criptó)

Finalment, la gràfica de la figura 29, on veiem que inicialment es situa gairebé als 3 W/m²·K per una amplada de cambra de 5mm. La disminució a partir dels 10mm és molt similar a la resta de casos, continuant però a un ritme més lent a mesura que augmenta la separació, arribant també a un valor U de 2,25 W/m²·K als 40 mm.

5.6 Comparativa Criptó

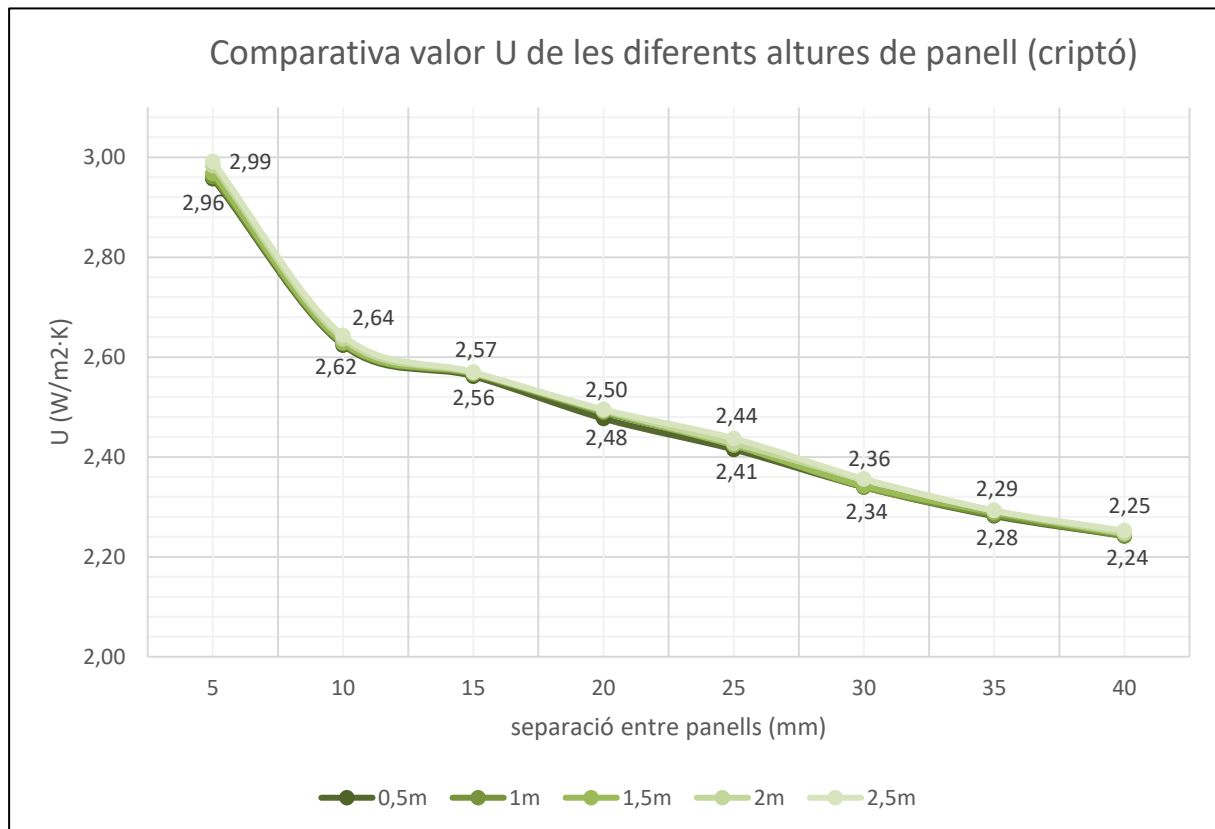


Figura 30: Taula comparativa valors U segons simulació (Criptó)

Com podem veure, els valors de U dels panells són molt similars al llarg de totes les amplades de cambra de gas argó. Partint de valors entre 2,96 i 2,99 W/m²·K per una amplada de 5mm.

Seguidament, les corbes descendeixen considerablement fins a disminuir el pendent de decreixement entre als 10mm de separació entre panells, en valors compresos entre els 2,62 i 2,64 W/m²·K.

Finalment, veiem com a partir dels 20mm d'amplada de cambra totes les línies descendeixen amb valors similars, arribant entre 2,24 i 2,25 per una amplada de cambra de 40mm.

Analitzant la poca desviació de resultats podem comprovar que no apareix cap signe que indiqui l'afectació de l'altura de cambra en el valor U quan el panell conté criptó dins la cambra de gas.

5.7 Xenó

- Altura del panell: 0,5 m:

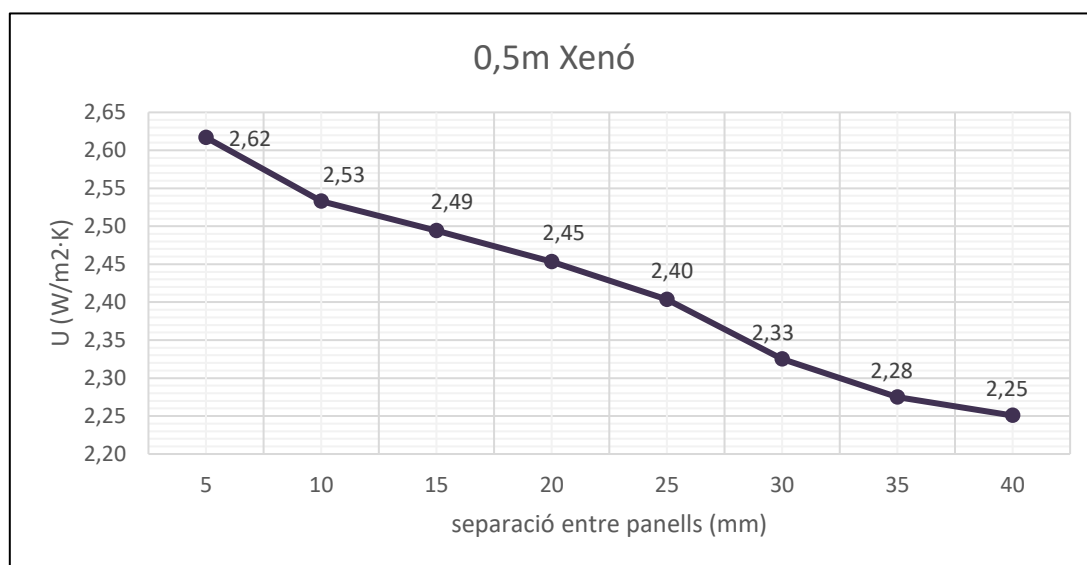


Figura 31: Taula valors U segons simulació (0,5 Xenó)

A la gràfica de la figura 31 corresponent a 0,5m d'altura de panell amb Xenó com a gas dins la cambra, s'observa una tendència similar a la dels gasos anteriors pel que fa al clar decreixement a mesura que la separació entre els panells augmenta des fins a 40 mm.

A diferència de la resta de gasos, veiem que la diferència entre les mesures contigües es manté força constant des de la primera, tot i ser la més gran amb 0,09 W/m²K entre els 5mm i els 10mm no destaca per sobre la resta.

La corba comença als 2,62 W/m²K per una amplada de 5mm i arriba fins als 2,25 W/m²K per una amplada de cambra de 40mm.

- Altura del panell: 1 m:

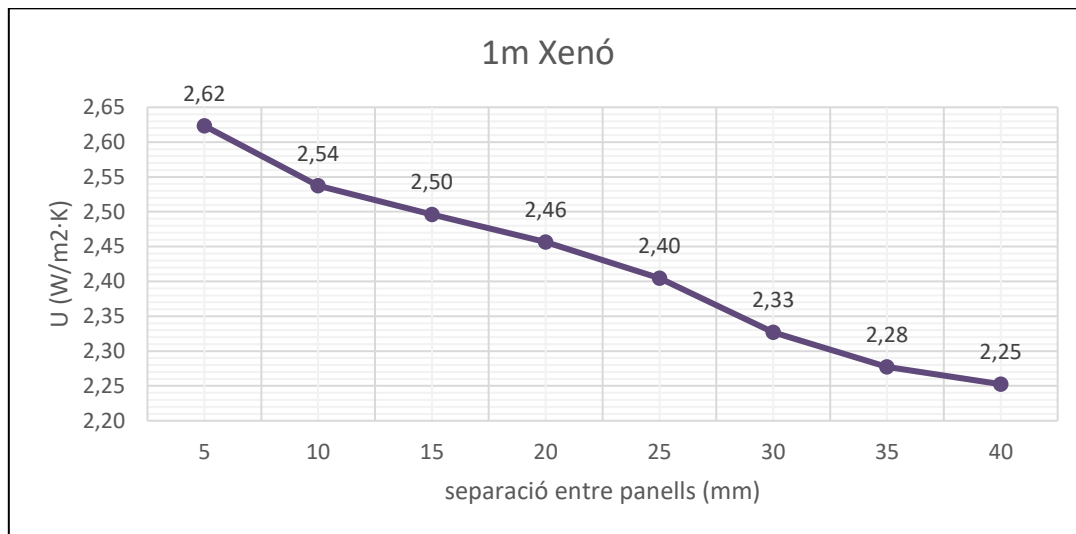


Figura 32: Taula valors U segons simulació (1 Xenó)

Tal com podem veure a la gràfica de la figura 32, els valors són pràcticament els mateixos que els de la gràfica de la figura 31. Veiem com tan sols varia alguna centèsima del valor de U al llarg de la corba.

- Altura del panell: 1,5 m:

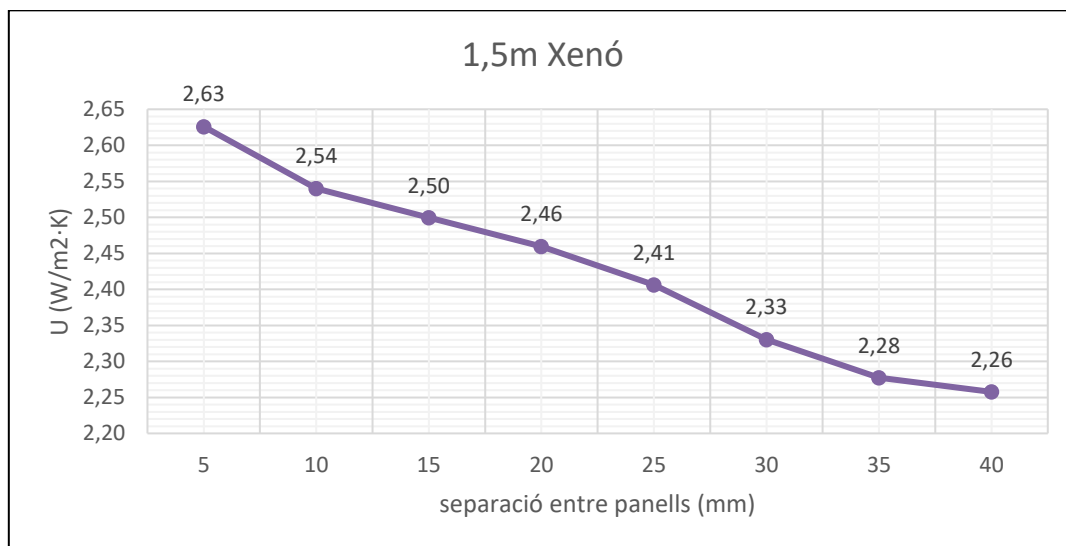


Figura 33: Taula valors U segons simulació (1,5 Xenó)

En el cas d'1,5m, veiem a la figura 33 que també hi ha una gran semblança amb les dues gràfiques anteriors corresponents als 0,5m i 1m d'altura de panell.

- Altura del panell: 2 m:

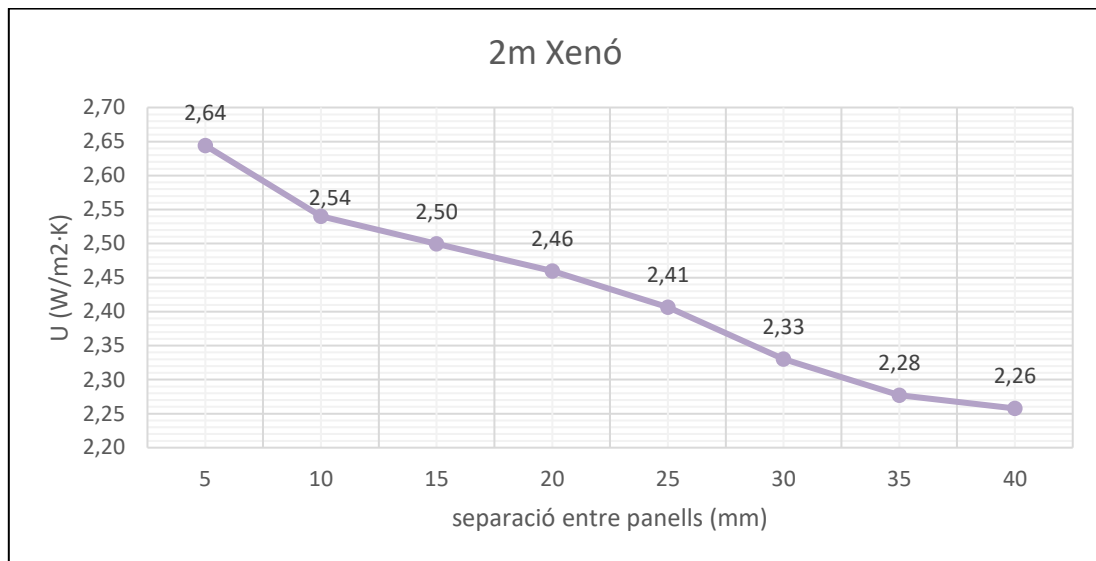


Figura 34: Taula valors U segons simulació (2 Xenó)

A la figura 34 trobem un novament una gràfica molt similar a l'anterior de la figura 33. Inicia, per tant, als 2,64 W/m²K i també segueix amb una disminució del valor U pràcticament idèntica a les gràfiques de les altures de panell anteriors.

- Altura del panell: 2,5 m:

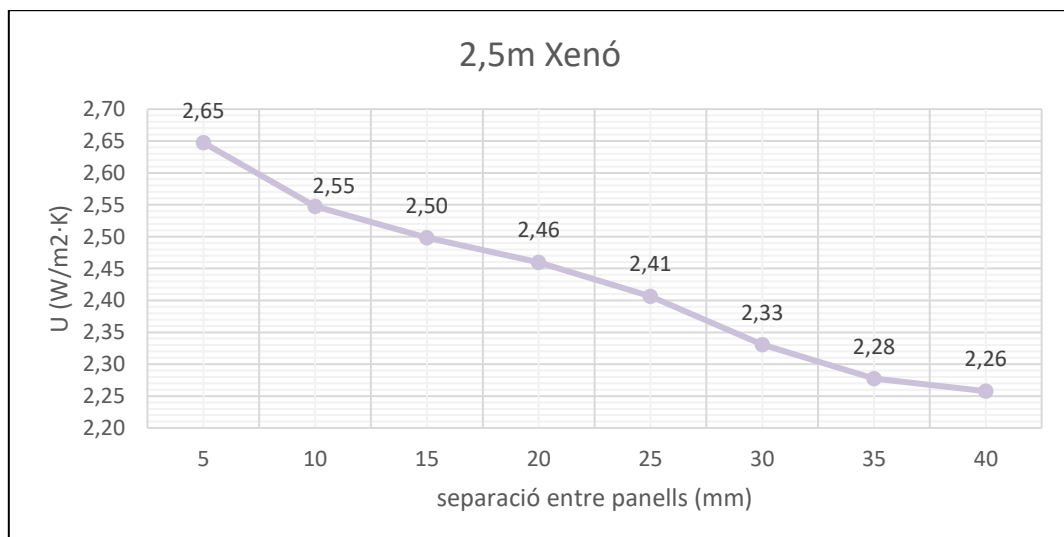


Figura 35: Taula valors U segons simulació (2,5 Xenó)

Finalment, veiem la disminució més gran de valor de U a la gràfica de la figura 35, on inicialment llegim un valor de 2,65 W/m²K per 5mm d'espessor, i baixant fins a 2,55 W/m²K als 10mm d'espessor. La disminució a partir d'aquest punt és molt similar a la resta de casos, arribant a un valor U de 2,15 W/m²-K als 50 mm.

5.8 Comparativa Xenó

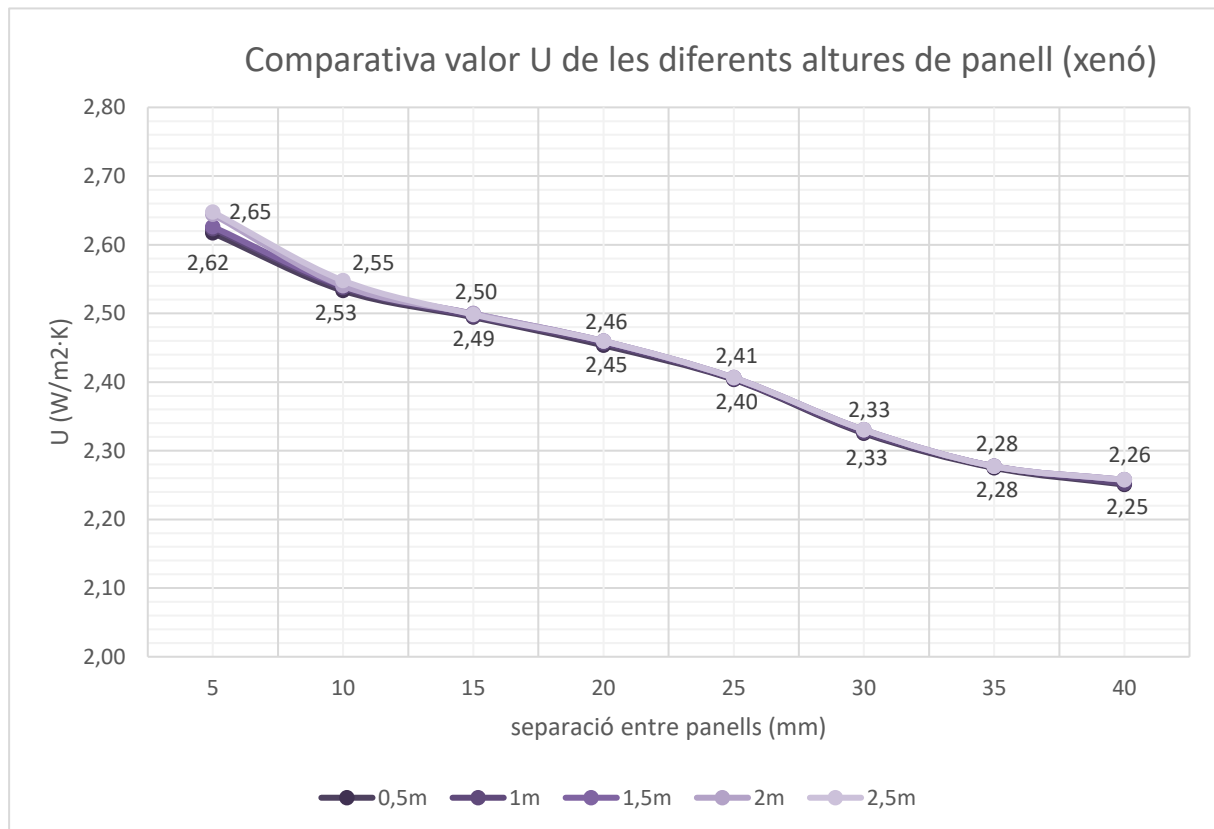


Figura 36: Taula comparativa valors U segons simulació (Xenó)

Com podem veure a la figura 36, el cas del Xenó és el més regular al llarg de tota la corba, fet que ens indica una transmissió tèrmica molt semblant en les diferents altures de panell estudiades. Partint de valors entre 2,62 i 2,65 W/m²-K per una amplada de 5mm, veiem com totes les línies descendeixen amb valors similars, arribant entre 2,25 i 2,26 per una amplada de cambra de 40mm.

Analitzant la poca desviació de resultats podem comprovar que no apareix cap signe que indiqui l'afectació de l'altura de cambra en el valor U quan el panell conté xenó dins la cambra de gas.

6. COMPARATIVA ENTRE CÀLCUL I SIMULACIÓ

En aquest apartat es comparen i s'analitzen les gràfiques resultants del càlcul segons normativa de l'apartat 4 i les obtingudes segons simulació de l'apartat 5.

6.1 Aire

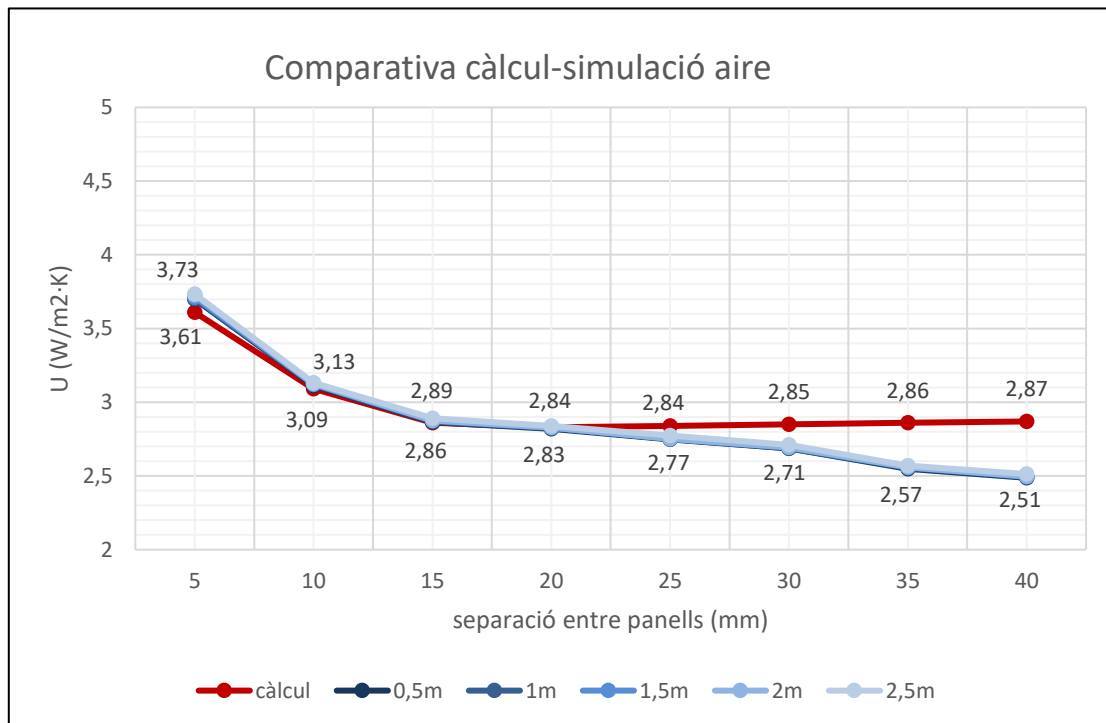


Figura 37: Taula comparativa càlcul-simulació (Aire)

A la gràfica de la figura 37 podem veure representades en blau les corbes de les diferents altures de panell i els valors que pren U amb l'augment d'amplada de la cambra de gas, en aquest cas aire. En vermell, tenim representat els valors calculats seguint la normativa UNE-EN 673.

Podem veure que durant els primers 20mm totes les corbes van descendent, les simulacions en panells segueixen pràcticament la línia de càlcul, iniciant d'un valor una mica superior als 3,61 W/m²K que indica la corba vermella per 5 mm d'amplada de cambra.

Totes les corbes descendeixen començant de forma més marcada els primers 15mm establint-se al entre 2,89 i 2,86 W/m²K tots els valors. Als 20mm veiem com queden unificades totes les corbes creuant gairebé un únic punt i a partir dels 25mm observem com la corba del

càlcul comença a augmentar de valors lentament fins a arribar als 2,87 W/m²K mentre que les corbes de simulació disminueixen el valor de U de forma gairebé constant fins a situar-se als 2,51 W/m²K per una amplada de cambra de 40mm.

Pel que fa a la simulació, podem veure un clar canvi de pendent de decreixement a partir dels 15mm però aquest no deixa de disminuir el valor de U al llarg de l'augment de separació entre panells.

6.2 Argó

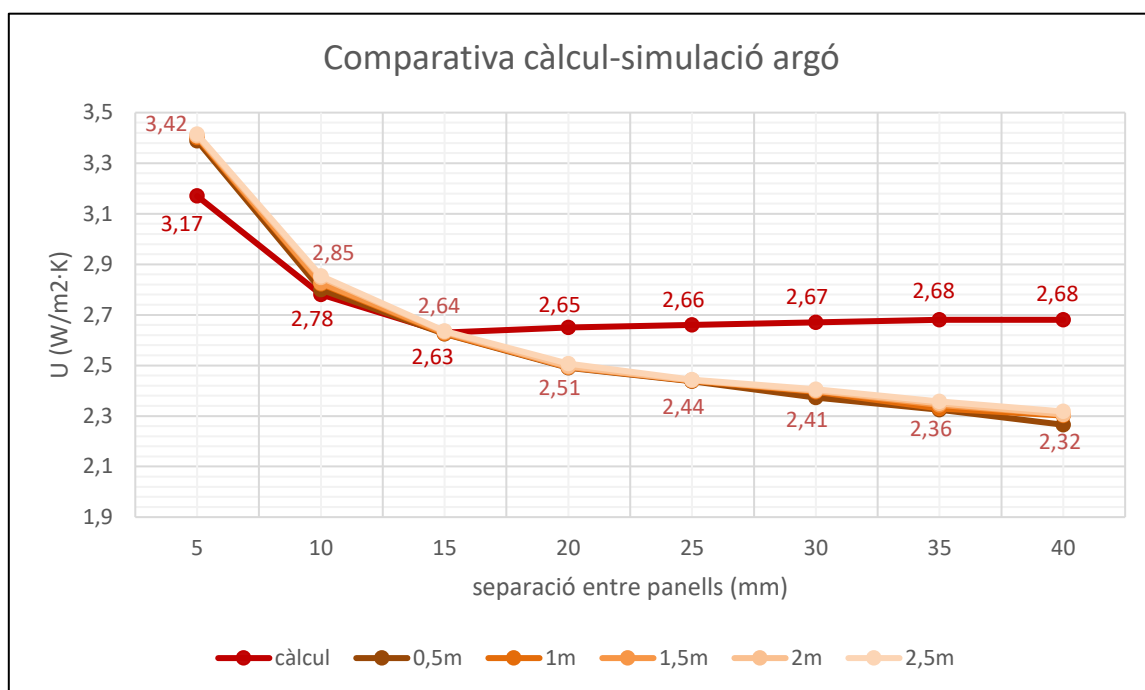


Figura 38: Taula comparativa càlcul-simulació (Argó)

Al gràfic de la figura 38 trobem representades en diferents taronges les corbes de les simulacions de panells de diferents altures, mentre que en vermell tenim representat la corba del càlcul teòric segons la normativa UNE-EN 673.

Observem com els primers 15mm totes les corbes tenen un pendent decreixent, situant-se al mateix valor d'uns 2,63 W/m²K.

A partir d'aquest punt veiem com la corba de càlcul augmenta de valor de U passant a un pendent de creixement positiu, situant-se a 2,68 W/m²K per una amplada de 40mm. Per contra, les corbes que provenen dels resultats de la simulació segueixen decreixent però a un

ritme més baix que als primers 15mm, situant-se a un valor d'uns 2,32 W/m²K per una amplada de 40mm.

Si comparem els resultats de l'argó amb els de l'apartat 6.1 de l'aire, podem veure com en general es situen les corbes de l'argó en valors de U més baixos i el canvi de pendent tant de la corba de càlcul com de les corbes de simulació apareixen a menys amplada de cambra.

6.3 Criptó

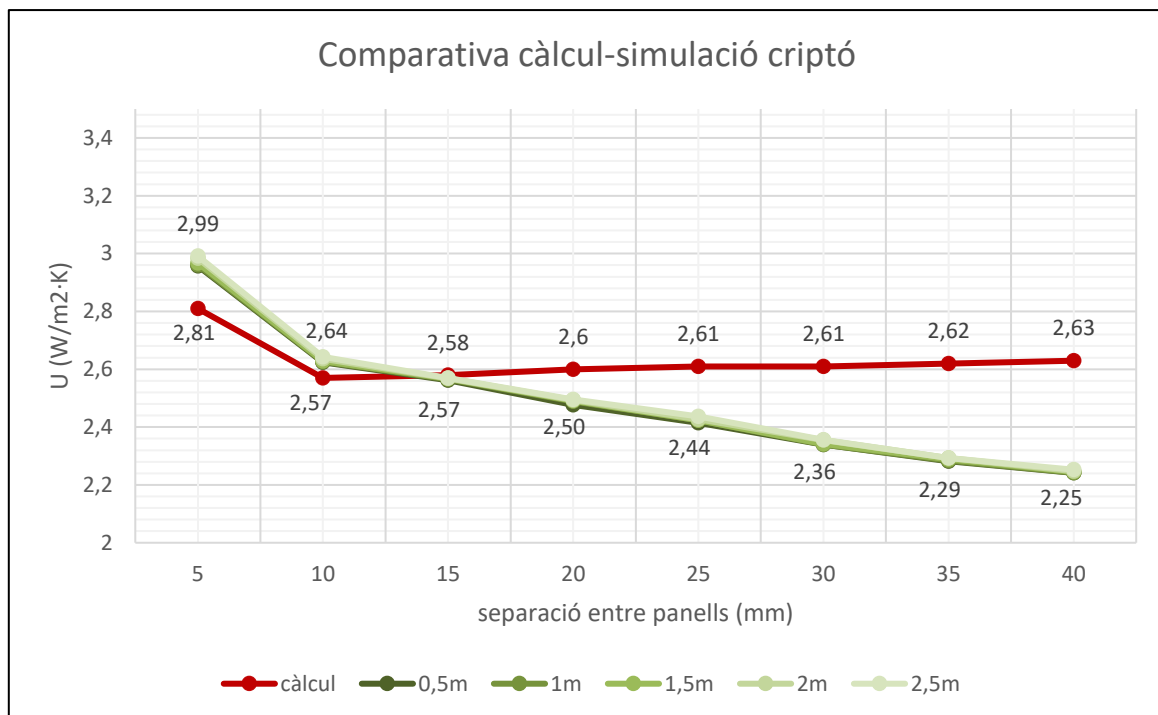


Figura 39: Taula comparativa càlcul-simulació (Criptó)

Al gràfic de la figura 39 hi apareixen representades, en diferents tonalitats de verd, les corbes de les simulacions de panells de diferents altures, mentre que en vermell tenim representada la corba del càlcul teòric segons la normativa UNE-EN 673.

Observem com en aquest cas, només durant el primer tram (entre 5 i 10mm) totes les corbes tenen un pendent decreixent, parteixen de valors similars entre els 2,81 i 2,99 W/m²K i es situen per a una amplada de 10mm a un rang de valors més similars encara (entre 2,57 i 2,64 W/m²K).

Als 15mm d'amplada de cambra observem com la corba de càlcul augmenta de valor de U en tan sols 0,01 W/m²K i les corbes de la simulació queden unificades situant-se pràcticament al mateix valor que la corba del càlcul. A partir d'aquest punt fins als 40mm es repeteix el patró vist anteriorment als apartats 6.1 i 6.2 on les corbes de simulació i la del càlcul es separen arribant a 2,25 i 2,63 W/m²K respectivament per a una distància entre panells de 40mm.

Si comparem els resultats del criptó amb els de l'argó i de l'aire, podem veure la millora en transferència tèrmica del criptó respecte els altres dos, també observem com el canvi de pendent apareix abans, als 10mm d'amplada de cambra.

6.4 Xenó

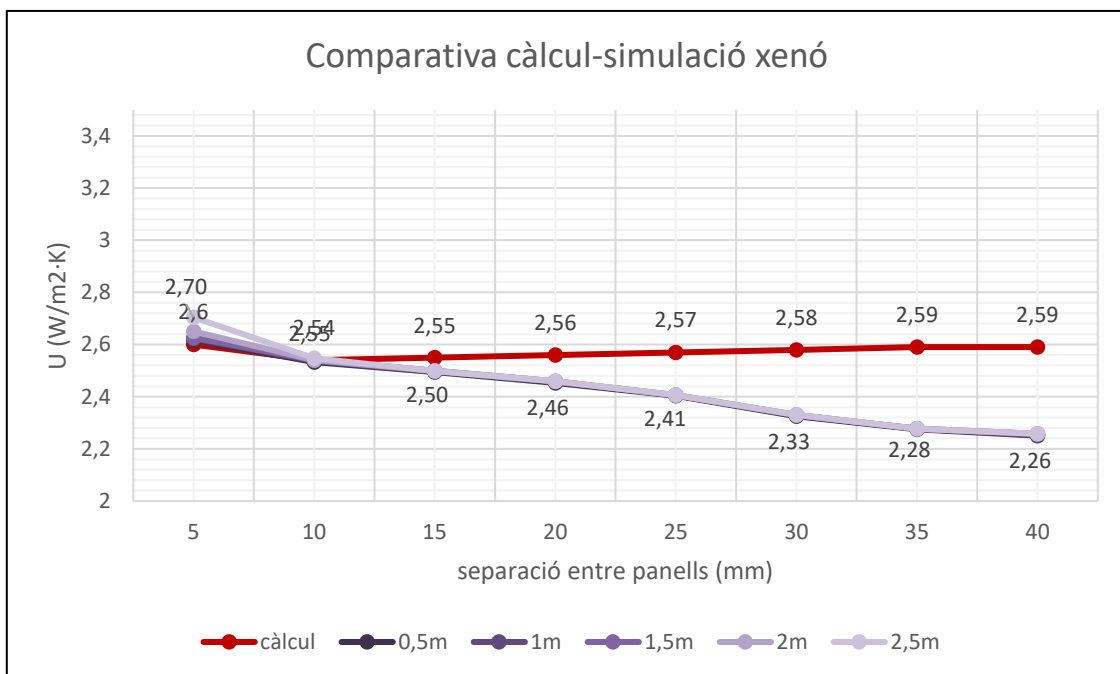


Figura 40: Taula comparativa càlcul-simulació (Xenó)

Per últim, trobem el gràfic de la figura 40 on hi apareixen representades, en diferents tonalitats de lila, les corbes de les simulacions de panells de diferents altures, mentre que en vermell tenim representada novament la corba del càlcul teòric segons la normativa UNE-EN 673.

Observem com, igualment veiem a l'anterior de l'apartat 6.3, només durant el primer tram (entre 5 i 10mm) totes les corbes tenen un pendent decreixent, partint de valors encara més

similars (entre els 2,60 i 2,70 W/m²K) i es situen per a una amplada de 10mm a gairebé un únic valor, uns 2,55 W/m²K.

A partir dels 15mm d'amplada de cambra observem com la corba de càlcul augmenta de valor de U mentre que les corbes de la simulació novament unificades segueixen un pendent força constant fins arribar als 2,26 W/m²K per una separació de 40mm.

Si comparem els resultats del xenó amb els del criptó, l'argó i de l'aire, podem veure la millora en transferència tèrmica del xenó respecte els altres tres i la menor desviació de resultats per distàncies de 5 i 10mm. Igualment que amb el Criptó el canvi de pendent apareix als 10mm d'amplada de cambra.

6.5 Comparativa general

Si analitzem els resultats dels quatre apartats anteriors veiem com clarament la simulació i el càlcul tenen una desviació de resultats a partir de certa amplada de cambra depenent del gas estudiat.

La corba de càlcul pateix un canvi en tots els casos, passant de pendent negatiu a positiu. Aquest canvi apareix quan al operar amb les fórmules de la normativa UNE-EN 673 el número de Nusselt és major a 1, fet que indica una afectació negativa de la convecció en la transmitància tèrmica.

Per altra banda, veiem com l'aparició de pendent positiu en la corba de càlcul coincideix amb una disminució de pendent en les corbes de simulació, però aquestes segueixen disminuint al llarg de l'augment d'amplada de la cambra.

7. COSTOS

Segons la llista de costos mitjans dels elements en el mercat que apareix a la wikipedia (https://en.wikipedia.org/wiki/Prices_of_chemical_elements), aquests són els preus de cada un dels elements estudiats:

Aire	-	
Argó	0,931	\$/kg
Criptó	290	\$/kg
Xenó	1800	\$/kg

Figura 41: Taula comparativa costos dels gasos

8. CONCLUSIONS

Un cop realitzat l'estudi del comportament tèrmic d'un doble vidre hermètic, analitzant la transmitància tèrmica per a diferents gasos, amplades de cambra de gas i altures de panell mitjançant el càlcul segons la normativa UNE-EN 673 i la simulació per elements finits amb el programari ANSYS, es pot concloure que:

Amb relació als gasos entre panells, l'aire és el menys favorable dels quatre gasos estudiats pel que fa a la millora de la transmitància tèrmica. El segueix l'argó, que millora considerablement les propietats aïllants del panell, tot i que no arriba als valors de transmitància tèrmica (U) que aconseguen el criptó i el xenó. Aquest últim, el xenó, es confirma com el millor aïllant tèrmic dels gasos estudiats.

Pel que fa a la separació entre panells de vidre, podem concloure que la variació d'aquesta afecta de manera directa en la transmitància tèrmica del panell. Essent la millora significativa durant l'augment dels primers mil·límetres d'amplada i moderada a mesura que s'augmenta la distància entre panells; donant així per vàlids els resultats la simulació per sobre els de la normativa, on no podem assegurar que la convecció tingui un efecte realista, ja que pren valors molt conservadors i deixa de coincidir amb la simulació en amplades de cambra de grans dimensions (>20 mm), poc freqüents en el mercat.

Pel que fa a l'altura de panell, podem concloure que: L'altura del panell no influeix en la transmitància tèrmica del conjunt.

Un cop analitzats els comportaments tèrmics de cada gas en cada cas, tenint en compte el cost i el rendiment, l'Argó és la millor opció per ser utilitzat en DVH comuns en la construcció. Això és gràcies a la millora tèrmica que ofereix respecte a l'aire i el seu baix cost comparat amb el criptó i el xenó, els quals són 300 i 1900 vegades més costosos respectivament.

Cal remarcar que els resultats i conclusions obtingudes contempnen una amplada de panells de 16 mm de vidre sodocàlcic, per tant, els resultats numèrics esmentats en les conclusions poden variar per una amplada o material de panells diferent.

9. RELACIÓ DE DOCUMENTS

El llistat de documents de conformen l'estudi són:

Document 1: Memòria i Annexos.

Annex A: Càlculs.

Annex B: Fixació de paràmetres i exemple de la simulació.

Annex C: Taules suplementàries.

Document 2: Pressupost.

10. BIBLIOGRAFIA

1. Standard, E. U., & Europeenne, N. (2011). UNE-EN 673 Determinació del coeficient de transmissió tèrmica. *Europa*.
2. “Bekkouche, Sidi Mohammed El Amine & Benouaz, Tayeb & Mohamed Kamal, Cherier & Hamdani, Maamar & Yaïche, Redha & Benamrane, Noceir. (2013). *Thermal resistances of air in cavity walls and their effect upon the thermal insulation performance*. 4.459–466.”
3. “Koshlak, H., Basok, B., & Davydenko, B. (2024). *Heat Transfer through Double-Chamber Glass Unit with Low-Emission Coating*. *Energies*, 17(5), 1100.”
4. De Giorgi, L., Bertola, V., & Cafaro, E. (2011). Thermal convection in double glazed windows with structured gap. *Energy and Buildings*,.
5. Wright, J. L. (1996) A Correlation to Quantify Convective Heat Transfer Between Vertical Window Glazings *ASHRAE Transactions*.

ANNEX A: CÀLCULS

A.1 Introducció

Els càlculs s'han dut a terme seguint les fórmules, els requeriments i les dades proporcionades per la normativa UNE-EN 673.

S'ha creat una fulla de càlcul per agilitzar el procediment operacional i obtenir resultats més segurs, en aquest annex es donarà un exemple del procediment i les fórmules utilitzades en el càlcul.

A.2 Exemple de càlcul

Cas concret:

- Gas: Aire.
- Separació entre panells: 15mm.

Càlcul:

Primerament es calcula el número de Plandtl i número de Grashof.

$$P_r = \frac{\mu c}{\lambda} = \frac{0,00001761 \cdot 1008}{0,0296} = \mathbf{0,5996}$$

$$G_r = \frac{9,81 \text{ s}^3 \cdot \Delta T \cdot \rho^2}{T_m \cdot \mu^2} = \frac{9,81 \cdot 0,015^3 \cdot 15 \cdot 1,232^2}{283 \cdot 0,00001761^2} = \mathbf{8580,3969}$$

A continuació, s'utilitzen aquests valors pel càlcul del número de Nusselt:

$$N_u = A \cdot (G_r \cdot P_r)^n = 0,035 \cdot (8580,3969 \cdot 0,5996)^{0,38} = \mathbf{0,9003}$$

Com que $N_u \text{ calculat} < 1$, $N_u = \mathbf{1}$

A continuació, es calcula la conductància del gas h_g :

$$h_{g,k} = N_u \frac{\lambda_k}{s_k} = 1 \cdot \frac{0,0296}{0,015} = \mathbf{1,9733 \text{ W/(m}^2\text{K)}}$$

Seguidament obtenim la conductància per radiació h_r :

$$\begin{aligned} h_{r,k} &= 4\sigma \left(\frac{1}{\varepsilon_{1,k}} + \frac{1}{\varepsilon_{2,k}} - 1 \right)^{-1} T_{m,k}^3 = \\ &= 4 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \left(\frac{1}{0,837} + \frac{1}{0,837} - 1 \right)^{-1} 283^3 = \mathbf{3,6995 \text{ W/(m}^2\text{K)}} \end{aligned}$$

Un cop trobades h_g i h_r , trobem h_s :

$$h_{s,k} = h_{r,k} + h_{g,k} = 1,9773 + 3,6995 = \mathbf{5,6728 \text{ W/(m}^2\text{K)}}$$

Seguidament, trobem h_t :

$$\frac{1}{h_t} = \sum_1^N \frac{1}{h_s} + \sum_1^M d_j \cdot r_j = \frac{1}{5,6728} + 0,0016 + 0,0016$$

$$h_t = \mathbf{5,5717 \text{ W/(m}^2\text{K)}}$$

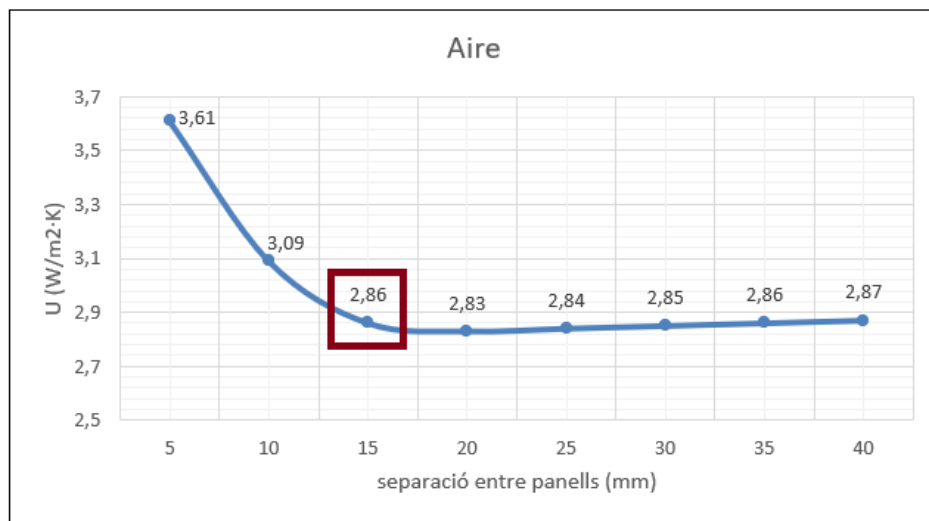
Finalment, trobem el valor de U amb la primera equació proposada a la normativa i considerant:

- $h_e = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$
- $h_i = 7,7 \text{ W/m}^2\text{K}$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_t} + \frac{1}{h_i} = \frac{1}{25} + \frac{1}{7,7} + \frac{1}{5,5717}$$

$$U = 2,86 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Aquest valor el podem trobar a la gràfica del càlcul de l'aire a l'apartat 4.1:

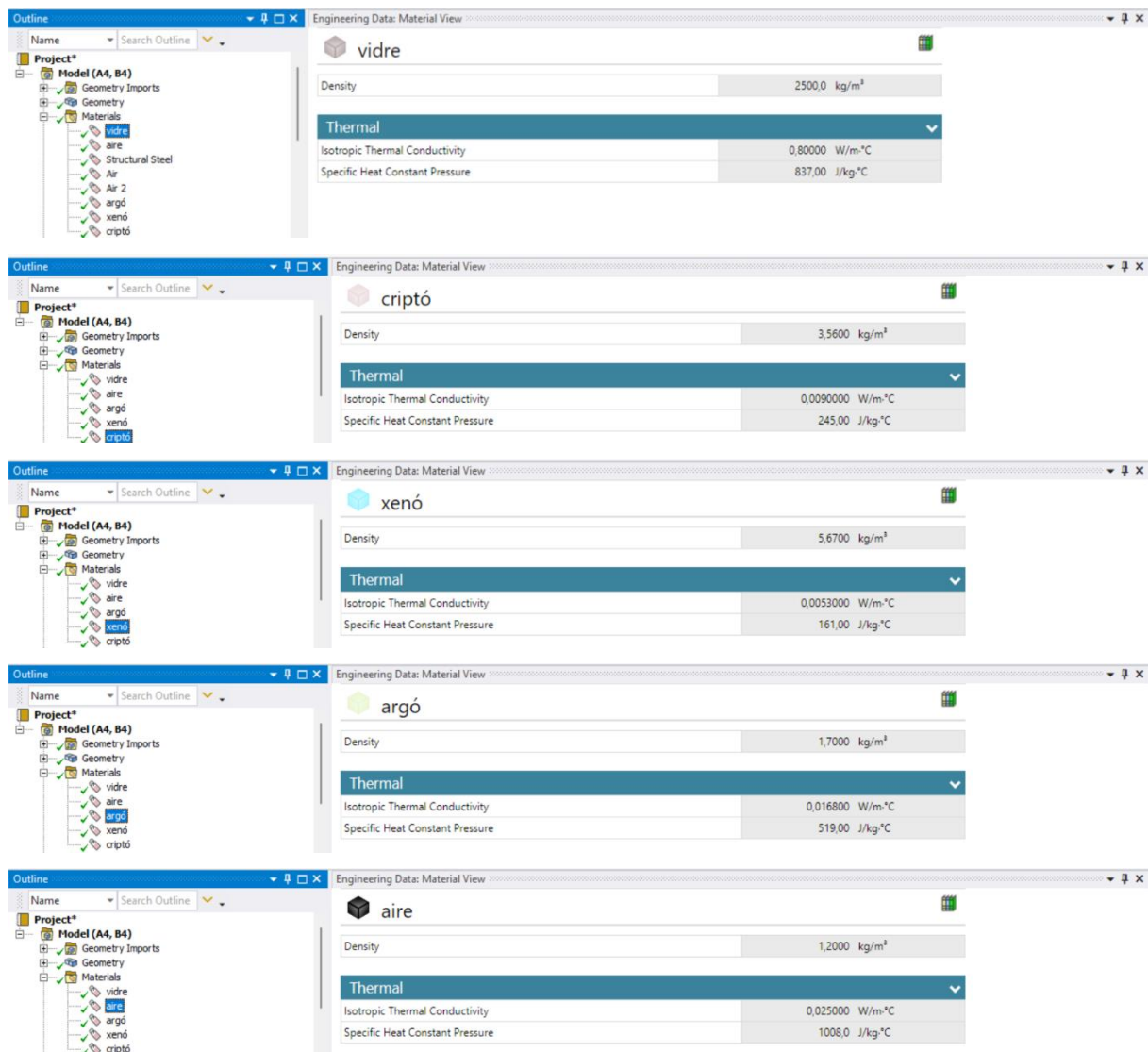


ANNEX B: FIXACIÓ DE PARÀMETRES I EXEMPLE DE LA SIMULACIÓ

B.1 Fixació de paràmetres

Inicialment s'han entrat les dades geomètriques del panell en la geometria del cas, essent variables la distància entre panells i l'altura del conjunt sencer. S'ha mantingut fixe l'amplada de 16mm de cada un dels dos panells.

Seguidament, s'han introduït les propietats dels materials a utilitzar, tal com es mostra a continuació:

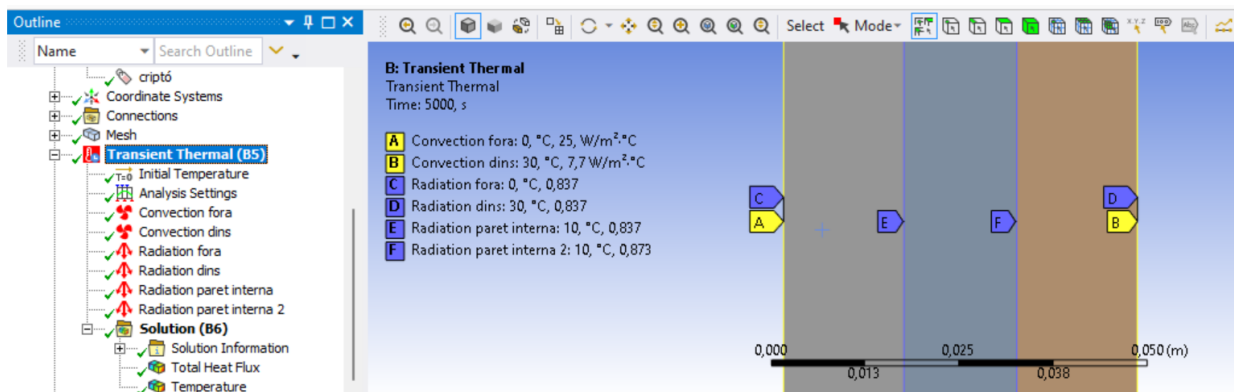


Captura 1: Propietats dels materials introduïdes

A continuació, s'han definit les condicions de contorn del panell, respectant els coeficients de convecció i radiació indicats en la normativa UNE-EN 673:

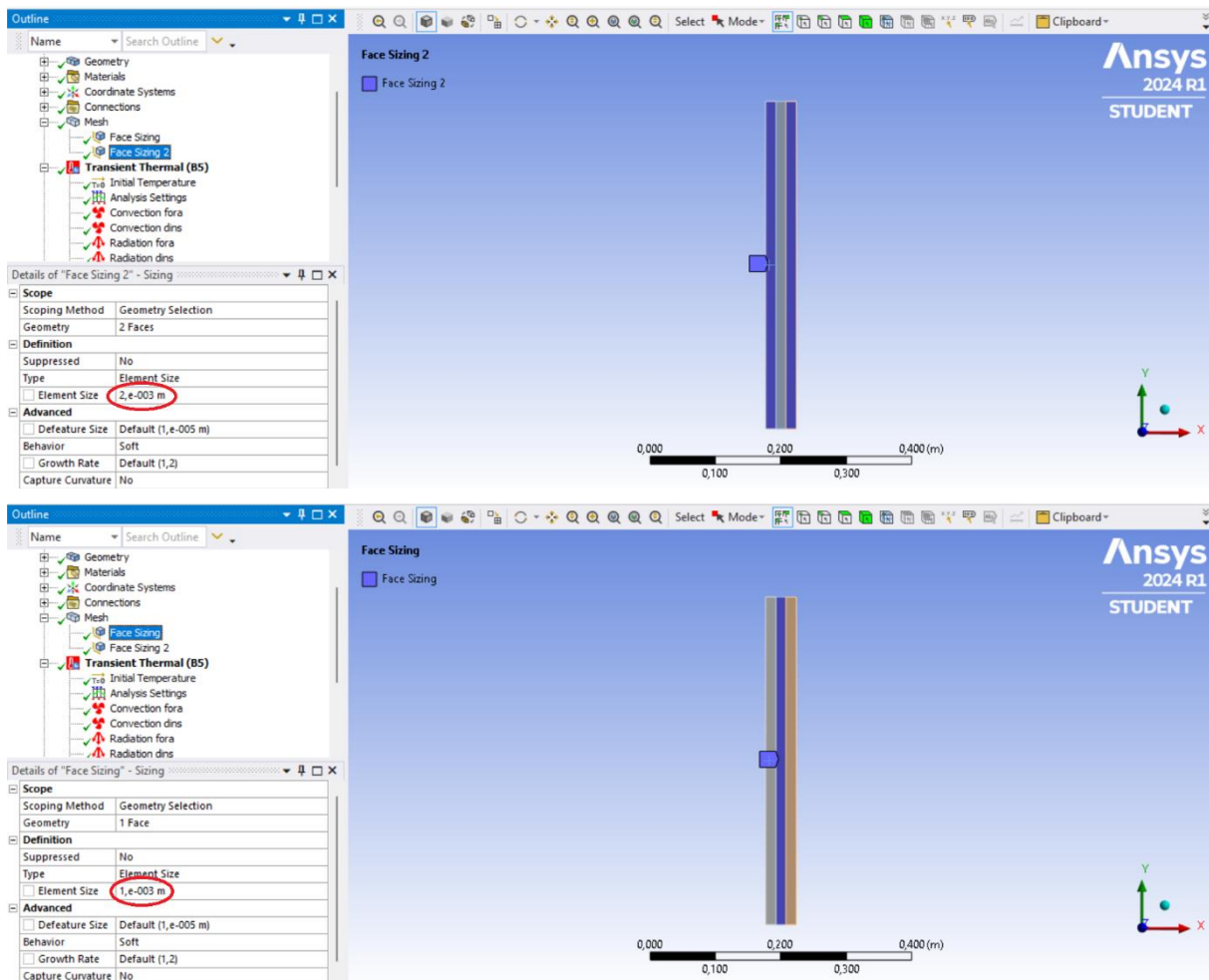
r	resistivitat tèrmica del vidre sodocàlcico	1,0 m ² ·K/W
ϵ	emisivitat corregida para superfície de vidre sodocàlcico no recubierto y borisilicatado	0,837
ΔT	diferencia de temperatures entre superfícies de vidre de confinamiento	15 K
T_m	temperatura media de la cámara de gas	283 K
σ	constante de Stefan-Boltzmann	$5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
h_e	coeficiente de transferencia externa de calor de superficies de vidrio sodocàlcico no recubierto	25 W/(m ² ·K)
h_i	coeficiente de transferencia interna de calor de superficies de vidrio sodocàlcico no recubierto	7,7 W/(m ² ·K)

Aplicats en el model de la següent forma:



Captura 2: Condicions de contorn

Seguidament, s'ha aplicat un mallat de 0,002m en els panells de vidre i de 0,001m a l'interior de la cambra on la temperatura varia un rang major. S'ha comprovat que el mallat sigui prou petit com per arribar a la precisió requerida per l'estudi. Es mostra el mallat en la següent captura:

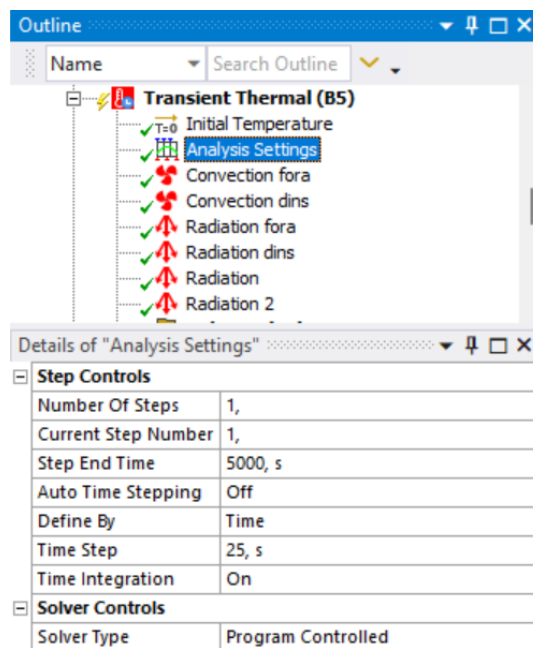


Captura 3: Mallat

B.2 Exemple de simulació

A continuació es presenta un exemple del procés que s'ha realitzat per obtenir cada un dels valors de U per cada amplada, altura i gas de la cambra.

Primerament, s'ha configurat un anàlisi *Transient-Thermal*, el qual mostra la variació del comportament tèrmic del panell al llarg del temps. S'ha establert un interval de temps de 5000s i que les dades siguin recollides cada 25s tal i com es mostra en la següent captura de pantalla del panell *Analysis Settings*:

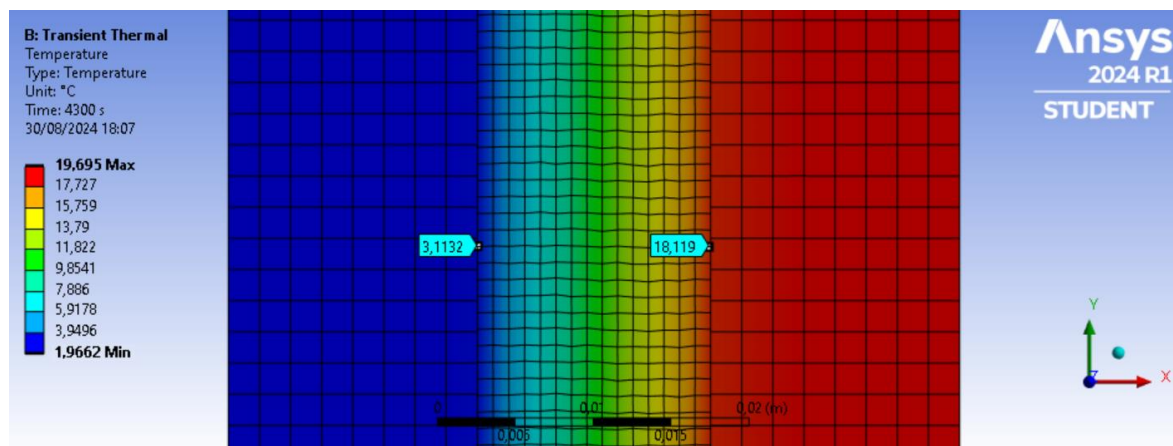


Captura 4: Analysis Settings

Un cop configurats els paràmetres d'anàlisi s'inicia la simulació. Amb els resultats d'aquesta, es busca al llarg dels 5000s analitzats el punt on es compleixin millor les condicions requerides per la normativa UNE-EN 673 per declarar el valor U d'un DVH. Aquestes condicions són:

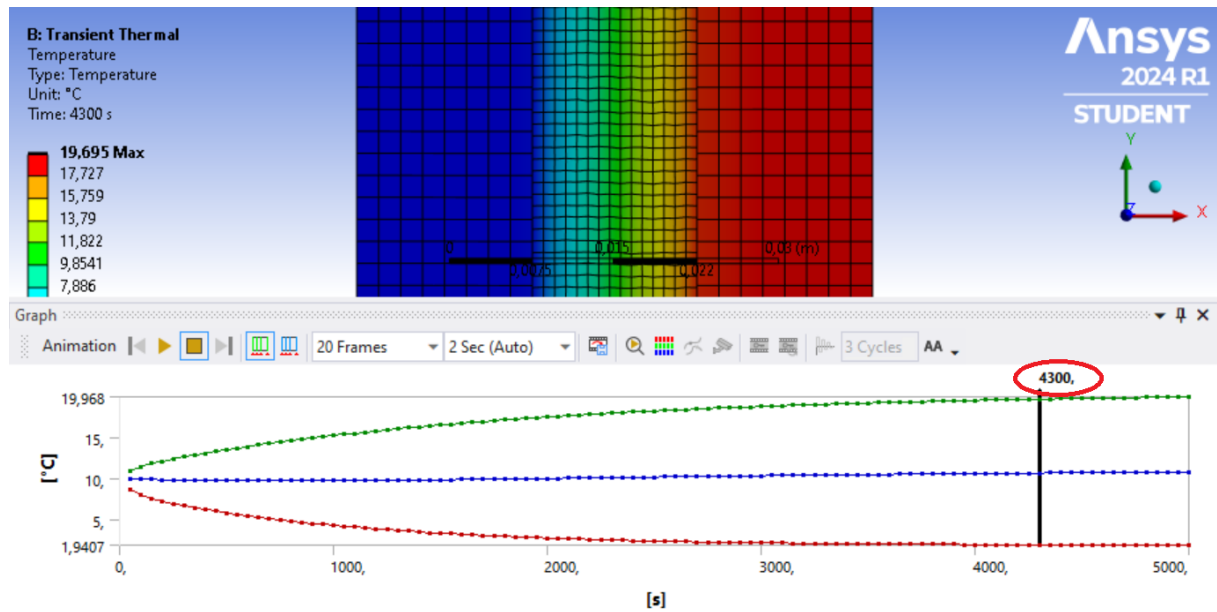
- Diferència entre temperatures de les parets interiors del panell: 15°C.
- Temperatura mitjana dins la cambra de 10°C.

Es troba el punt que ho compleix en la solució de la temperatura ($\Delta T=15,01^\circ\text{C}$) ($T_m= 10,8^\circ\text{C}$):



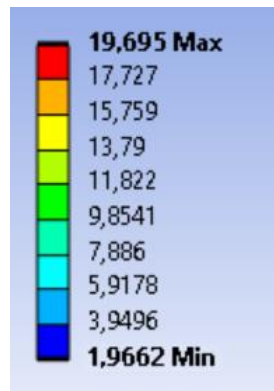
Captura 5: Temperatures interiors de la cambra

Es mira en quin instant es compleixen aquests valors:



Captura 6: Instant en gràfica de temperatura

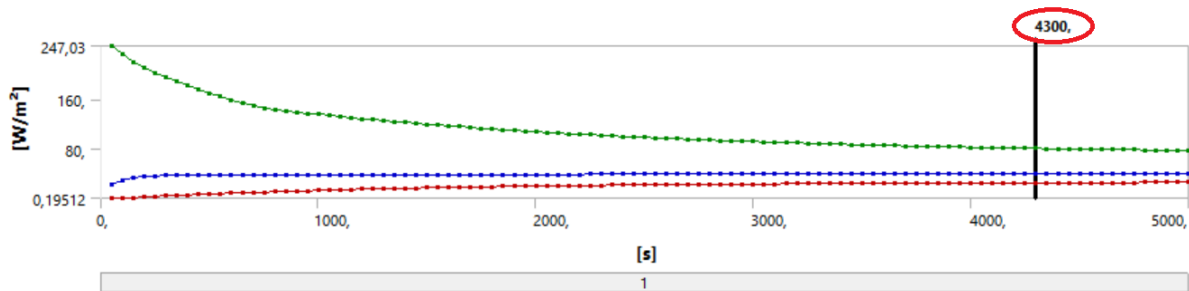
Un cop trobat aquest instant, es comprova la temperatura que travessa el panell, per fer-ho es mira la temperatura màxima i mínima per trobar la diferència entre aquestes dues, en aquest cas és de:



Captura 7: Temperatura

$$\Delta T = 19,695 - 1,966 = 17,729 \text{ K}$$

A continuació és selecciona a la gràfica del flux de calor que passa per la totalitat del panell que mostri els resultats en aquest mateix instant:



Captura 8: Instant en gràfica de flux de calor

Es mira el valor mig de flux de calor que travessa el panell sencer: **50,803 W/m²**.

Details of "Total Heat Flux"	
Suppressed	No
Integration Point Results	
Display Option	Averaged
Average Across Bodies	No
Results	
Minimum	29,988 W/m ²
Maximum	104,93 W/m ²
Average	50,803 W/m²
Minimum Occurs On	aire cambra
Maximum Occurs On	vidre interior
Minimum Value Over Time	
Minimum	0,29171 W/m ²
Maximum	35,996 W/m ²
Maximum Value Over Time	
Minimum	83,09 W/m ²
Maximum	247,03 W/m ²
Information	

Captura 9: Resultats dels valors en l'instant seleccionat

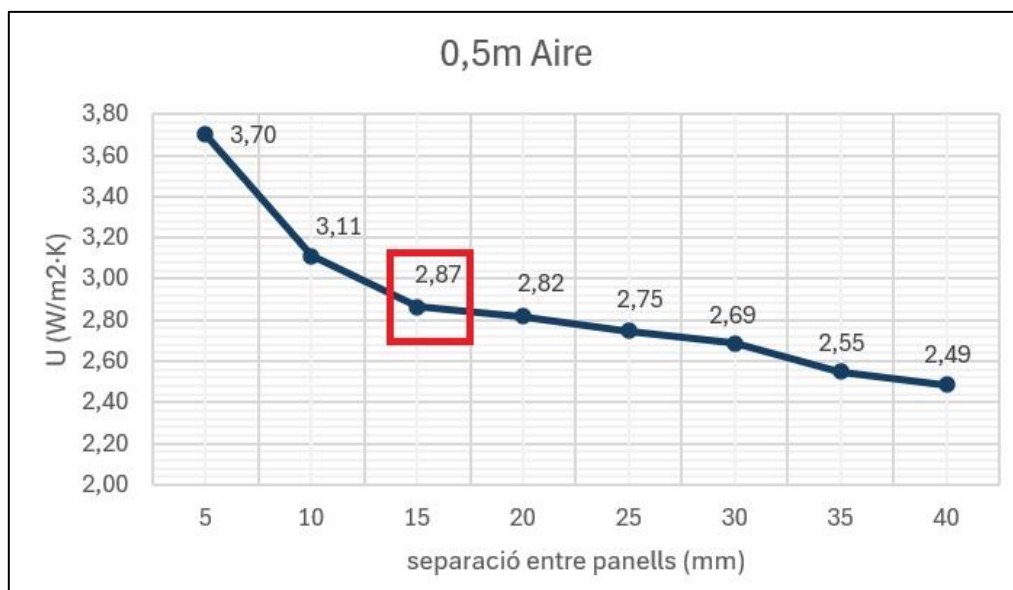
Finalment, es troba la transmitància tèrmica del panell amb quocient de:

$$U = \frac{\text{Heat flux}}{\Delta T} = \frac{50,803 \text{ W/m}^2}{17,729 \text{ K}} = 2,866 \text{ W/m}^2\text{K}.$$

Aquest resultat es troba en el document memòria, dins la gràfica de la figura 12 de l'apartat 5.1, pertanyent al panell de 0,5m d'altura i una amplada de cambra d'aire de 15mm:

0,5m				
separació (mm)	Diferència de Temperatura (K)	Heat Flux (W)	UTOTAL (W/m2·K)	
5	18,56	68,66	3,70	
10	18,38	57,2	3,11	
15	17,73	50,8	2,87	
20	17,67	49,82	2,82	
25	17,42	47,86	2,75	
30	17,27	46,39	2,69	
35	17,25	43,97	2,55	
40	17,22	42,83	2,49	

Captura 10: Resultats de l'exemple dins l'Excel de càlcul



Captura 10: Resultats de l'exemple dins la taula presentada en el document memòria

ANNEX C: TAULES COMPLEMENTÀRIES

C.1 Introducció

En aquest annex s'adjunten les taules complementàries amb els valors tabulats dels resultats de les simulacions amb el software ANSYS.

C.2 Taules

C2.1 Aire

separació (mm)	Diferència de Temperatura (K)	Heat Flux (W/m ²)	U _{TOTAL} (W/m ² ·K)
5	18,56	68,66	3,70
10	18,38	57,2	3,11
15	17,73	50,8	2,87
20	17,67	49,82	2,82
25	17,42	47,86	2,75
30	17,27	46,39	2,69
35	17,25	43,97	2,55
40	17,22	42,83	2,49

Taula 1: aire 0,5m

separació (mm)	Diferència de Temperatura (K)	Heat Flux (W/m ²)	U _{TOTAL} (W/m ² ·K)
5	18,56	68,74	3,70
10	18,38	57,34	3,12
15	17,73	50,87	2,87
20	17,67	49,91	2,82
25	17,42	47,92	2,75
30	17,27	46,41	2,69
35	17,25	44,08	2,56
40	17,22	42,92	2,49

Taula 2: aire 1m

separació (mm)	Diferència de Temperatura (K)	Heat Flux (W/m ²)	U _{TOTAL} (W/m ² ·K)
5	18,56	68,91	3,71
10	18,38	57,39	3,12
15	17,73	51,01	2,88
20	17,67	49,98	2,83
25	17,42	47,96	2,75
30	17,27	46,52	2,69
35	17,25	44,13	2,56
40	17,22	42,99	2,50

Taula 3: aire 1,5m

separació (mm)	Diferència de Temperatura (K)	Heat Flux (W/m ²)	U _{TOTAL} (W/m ² ·K)
5	18,56	69,19	3,73
10	18,38	57,47	3,13
15	17,73	51,01	2,88
20	17,67	49,98	2,83
25	17,42	47,96	2,75
30	17,27	46,52	2,69
35	17,25	44,13	2,56
40	17,22	42,99	2,50

Taula 4: aire 2m

separació (mm)	Diferència de Temperatura (K)	Heat Flux (W/m ²)	U _{TOTAL} (W/m ² ·K)
5	18,56	69,28	3,73
10	18,38	57,58	3,13
15	17,73	51,27	2,89
20	17,67	50,16	2,84
25	17,42	48,32	2,77
30	17,27	46,8	2,71
35	17,25	44,32	2,57
40	17,22	43,27	2,51

Taula 5: aire 2,5m

C2.2 Argó

separació (mm)	Diferència de Temperatura (K)	Heat Flux (W/m ²)	U _{TOTAL} (W/m ² ·K)
5	18,48	62,62	3,39
10	18,3	51,23	2,80
15	17,65	46,32	2,62
20	17,59	43,82	2,49
25	17,34	42,26	2,44
30	17,19	40,78	2,37
35	17,17	39,92	2,32
40	17,14	38,83	2,27

Taula 6: argó 0,5m

separació (mm)	Diferència de Temperatura (K)	Heat Flux (W/m ²)	U _{TOTAL} (W/m ² ·K)
5	18,48	62,86	3,40
10	18,3	51,65	2,82
15	17,65	46,36	2,63
20	17,59	43,86	2,49
25	17,34	42,29	2,44
30	17,19	41,19	2,40
35	17,17	40,01	2,33
40	17,14	39,45	2,30

Taula 7: argó 1m

separació (mm)	Diferència de Temperatura (K)	Heat Flux (W/m ²)	U _{TOTAL} (W/m ² ·K)
5	18,48	62,96	3,41
10	18,3	51,73	2,83
15	17,65	46,42	2,63
20	17,59	43,86	2,49
25	17,34	42,34	2,44
30	17,19	41,24	2,40
35	17,17	40,25	2,34
40	17,14	39,53	2,31

Taula 8: argó 1,5m

separació (mm)	Diferència de Temperatura (K)	Heat Flux (W/m ²)	U _{TOTAL} (W/m ² ·K)
5	18,48	62,99	3,41
10	18,3	52,12	2,85
15	17,65	46,49	2,63
20	17,59	43,93	2,50
25	17,34	42,34	2,44
30	17,19	41,27	2,40
35	17,17	40,35	2,35
40	17,14	39,53	2,31

Taula 9: argó 2m

separació (mm)	Diferència de Temperatura (K)	Heat Flux (W/m ²)	U _{TOTAL} (W/m ² ·K)
5	18,48	63,11	3,42
10	18,3	52,22	2,85
15	17,65	46,54	2,64
20	17,59	44,09	2,51
25	17,34	42,38	2,44
30	17,19	41,36	2,41
35	17,17	40,48	2,36
40	17,14	39,73	2,32

Taula 10: argó 2,5m

C2.3 Criptó

separació (mm)	Diferència de Temperatura (K)	Heat Flux (W/m ²)	U _{TOTAL} (W/m ² ·K)
5	18,64	55,12	2,96
10	17,96	47,12	2,62
15	17,81	45,62	2,56
20	17,75	43,96	2,48
25	17,5	42,26	2,41
30	17,35	40,59	2,34
35	17,33	39,54	2,28
40	17,3	38,78	2,24

Taula 11: criptó 0,5m

separació (mm)	Diferència de Temperatura (K)	Heat Flux (W/m ²)	U _{TOTAL} (W/m ² ·K)
5	18,64	55,19	2,96
10	17,96	47,17	2,63
15	17,81	45,69	2,57
20	17,75	44,18	2,49
25	17,5	42,41	2,42
30	17,35	40,59	2,34
35	17,33	39,58	2,28
40	17,3	38,79	2,24

Taula 12: criptó 1m

separació (mm)	Diferència de Temperatura (K)	Heat Flux (W/m ²)	U _{TOTAL} (W/m ² ·K)
5	18,64	55,31	2,97
10	17,96	47,21	2,63
15	17,81	45,72	2,57
20	17,75	44,22	2,49
25	17,5	42,41	2,42
30	17,35	40,63	2,34
35	17,33	39,66	2,29
40	17,3	38,84	2,25

Taula 13: criptó 1,5m

separació (mm)	Diferència de Temperatura (K)	Heat Flux (W/m ²)	U _{TOTAL} (W/m ² ·K)
5	18,64	55,61	2,98
10	17,96	47,35	2,64
15	17,81	45,75	2,57
20	17,75	44,26	2,49
25	17,5	42,48	2,43
30	17,35	40,86	2,36
35	17,33	39,73	2,29
40	17,3	38,88	2,25

Taula 14: criptó 2m

separació (mm)	Diferència de Temperatura (K)	Heat Flux (W/m ²)	U _{TOTAL} (W/m ² ·K)
5	18,64	55,76	2,99
10	17,96	47,47	2,64
15	17,81	45,77	2,57
20	17,75	44,29	2,50
25	17,5	42,65	2,44
30	17,35	40,88	2,36
35	17,33	39,73	2,29
40	17,3	38,97	2,25

Taula 15: criptó 2,5m

C2.4 Xenó

separació (mm)	Diferència de Temperatura (K)	Heat Flux (W/m ²)	U _{TOTAL} (W/m ² ·K)
5	18,69	48,91	2,62
10	18,31	46,38	2,53
15	17,86	44,55	2,49
20	17,8	43,67	2,45
25	17,55	42,18	2,40
30	17,4	40,46	2,33
35	17,38	39,54	2,28
40	17,35	39,05	2,25

Taula 16: xenó 0,5m

separació (mm)	Diferència de Temperatura (K)	Heat Flux (W/m ²)	U _{TOTAL} (W/m ² ·K)
5	18,69	49,03	2,62
10	18,31	46,46	2,54
15	17,86	44,58	2,50
20	17,8	43,73	2,46
25	17,55	42,2	2,40
30	17,4	40,49	2,33
35	17,38	39,58	2,28
40	17,35	39,08	2,25

Taula 17: xenó 1m

separació (mm)	Diferència de Temperatura (K)	Heat Flux (W/m ²)	U _{TOTAL} (W/m ² ·K)
5	18,69	49,08	2,63
10	18,31	46,51	2,54
15	17,86	44,64	2,50
20	17,8	43,78	2,46
25	17,55	42,23	2,41
30	17,4	40,55	2,33
35	17,38	39,58	2,28
40	17,35	39,17	2,26

Taula 18: xenó 1,5m

separació (mm)	Diferència de Temperatura (K)	Heat Flux (W/m ²)	U _{TOTAL} (W/m ² ·K)
5	18,69	49,42	2,64
10	18,31	46,51	2,54
15	17,86	44,64	2,50
20	17,8	43,78	2,46
25	17,55	42,23	2,41
30	17,4	40,55	2,33
35	17,38	39,58	2,28
40	17,35	39,17	2,26

Taula 19: xenó 2m

separació (mm)	Diferència de Temperatura (K)	Heat Flux (W/m ²)	U _{TOTAL} (W/m ² ·K)
5	18,69	49,48	2,65
10	18,31	46,65	2,55
15	17,86	44,62	2,50
20	17,8	43,78	2,46
25	17,55	42,23	2,41
30	17,4	40,55	2,33
35	17,38	39,58	2,28
40	17,35	39,17	2,26

Taula 20: xenó 2,5m