

Treball de Fi de Grau/Màster

Titulació
Grau d'Enginyeria en Tecnologies Industrials

**ESTUDI ENERGÈTIC D'UN HABITATGE EN RISC
D'EXCLUSIÓ SOCIAL AL BARRI DEL RAVAL**

MEMÒRIA

Autor: Borja Olives Verger
Director: Alfredo Guardo Zabaleta
Convocatòria: gener/2020



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

El present projecte forma part d'un estudi en col·laboració de l'ONG Oasiurbà, una associació que defensa el dret a l'habitatge des d'una dimensió tècnica i jurídica. Concretament, l'estudi en qüestió forma part d'una intervenció que es durà a terme a un habitatge del Raval. Entre altres coses, es vol millorar l'eficiència energètica de la llar per poder eliminar una de les causes més potencials de patir pobresa energètica. Abans de fer les intervencions, s'ha demanat estudiar el comportament energètic de pis i posteriorment analitzar futures intervencions. Aquest estudi es farà mitjançant simulacions d'ANSYS Fluent, que permet elaborar un model que ho representi a la perfecció.

L'abast del nostre projecte consisteix a elaborar un model funcional del pis per posteriors anàlisis energètiques. Per tant, els dos objectius són la confecció de la geometria de l'habitatge i elaboració d'una malla eficaç i eficient. El darrer aspecte és el més important, ja que permetrà trobar solucions que s'aproximin o no a la realitat. Per això mateix es farà una anàlisi de malla per l'aire interior del pis, que és el que pot desencadenar més problemes. Aquesta anàlisi consisteix a trobar una densitat de malla mínima perquè es calculin bons resultats, d'aquesta manera s'estalvien recursos: temps de càlcul i recursos computacionals.

El projecte està pensat perquè un altre voluntari utilitzi el model per analitzar el comportament energètic de l'habitatge i hi plantegi solucions. El model elaborat és bastant flexible i permet incorporar les possibles intervencions que es duran a terme. Així mateix, s'assegura una solució òptima: que pugui resoldre el problema energètic mitjançant recursos que estiguin a la disposició de la gent. L'objectiu final d'aquesta metodologia és trobar respostes en diversos edificis i elaborar un catàleg de solucions a l'abast dels veïns del Raval, ja que és l'única manera d'encarar un problema tan freqüent com la pobresa energètica.

Sumari

SUMARI	4
1. INTRODUCCIÓ	7
1.1. Contextualització	7
1.1.1. Pobresa energètica	7
1.1.2. Pobresa energètica a Barcelona	8
1.1.3. Barri del Raval	9
1.1.4. Oasiurbà	9
1.2 Origen del projecte	10
1.3 Objectius del projecte	11
1.4 Abast del projecte	11
2. MARC TEÒRIC	13
2.1 Confort tèrmic i eficiència energètica	13
2.1.1. Clima	13
2.1.3. Clima a Barcelona	14
2.1.4. Solucions tèrmiques	15
2.2. Transferència de calor	17
2.2.1 La conducció	17
2.2.1.1 Aïllants tèrmics	18
2.2.2. La convecció	19
2.2.3. La radiació	20
2.2.4. Configuracions comunes	20
2.3 Computacional Fluid Dynamics (CFD)	23
2.3.1. Funcionament	23
2.3.2. Mètodes de resolució	24
2.3.3. Comportament dels fluids	25
2.3.3.1. Anàlisi diferencial	26
2.4. Normativa	30
2.4.1. Codi tècnic d'edificació (CTE)	30
2.4.1.1. Estalvi Energia	30
2.4.1.1.1. Control de la demanda energètica	31
2.4.1.1.2. Càlcul de la transmissió en un envoltant tèrmic	33

2.4.1.2. Salubritat	35
2.4.1.2.1. Qualitat de l'aire	35
2.4.1.2.2. Dimensions:	37
2.4.2. Lleis Europees.....	37
2.4.2.1. El Certificat Energètic	37
2.4.2.2. Certificat Energètic a Catalunya.....	39
3. METODOLOGIA	40
3.1. Presentació del cas d'estudi	40
3.1.1. L'edifici.....	40
3.1.2. 4t 1a.....	41
3.2. Confecció de la geometria	47
3.2.1. SOLIDWORKS.....	47
3.2.2. DesignModeler	50
3.2.2.1. Modificació de les parets	50
3.2.2.2. Construcció del sostre	52
3.2.2.3. Implementació de l'aire	53
3.2.2.4. Reparació de les connexions	56
3.3. Elaboració de la malla.....	58
3.3.1. Connections	58
3.3.2. Name Selections	59
3.3.3. Mesh	62
3.3.3.1. Aire exterior.....	62
3.3.3.2. Parets.....	63
3.3.3.3. Aire interior.....	64
3.4 Configuració.....	66
3.4.1. Condicions de contorn	66
3.4.1.1. Models.....	66
3.4.1.1.1. Model de Radiació	67
3.4.1.2. Materials.....	68
3.4.1.3. Portes i finestres	69
3.4.1.4. Sostre i terra.....	71

3.4.2. Monitors	72
3.4.3. Especificacions de l'ordinador computacional.....	74
4. RESULTATS	75
4.1. Resultats qualitius de la simulació:	75
4.1.1. Ventilació	75
4.1.2. Temperatures	78
4.2. Resultats de l'estudi de la malla.....	80
CONCLUSIONS	85
Eficiència energètica mitjançant CFD	85
Model final.....	86
Recomanacions per futurs treballs.....	87
COST I IMPACTE AMBIENTAL	88
AGRAÏMENTS	91
BIBLIOGRAFIA	92

1. Introducció

1.1. Contextualització

1.1.1. Pobresa energètica

Segons Bouzarovski [1], la pobresa energètica és la incapacitat -d'una llar- d'arribar a un nivell social i materialment necessari de serveis domèstics de l'energia. Per tant, amb aquesta definició, es pretén defugir de la impossibilitat de pagament, ja que planteja la pobresa energètica com un problema transversal que afecta a partir de diferents vies tota la població mundial. En canvi, la vulnerabilitat energètica s'entén com la propensió d'una llar a no rebre una quantitat adequada de serveis energètics.

La situació de pobresa energètica no és una condició permanent, sinó temporal, i va més enllà de factors com ingressos familiars, preus de l'energia o eficiència energètica. Segons un informe fet per l'ajuntament de Barcelona el gener del 2018 [2], es deu a sis factors.

- Problemes d'accés: baixa disponibilitat de recursos energètics per a cobrir les necessitats de la llar.
- Problemes d'assequibilitat: Desproporció entre els ingressos i el cost de l'energia.
- Problemes de flexibilitat: Incapacitat per canviar de mode de proveïment d'energia.
- Problema d'eficiència: Pèrdua desproporcionada d'energia útil.
- Desajust entre els requeriments energètics i les necessitats.
- Manca de coneixement sobre programes de suport o formes eficients d'ús d'energia a la llar.

En el nostre estudi, es pretén eliminar un dels factors que pot arribar a crear una situació de pobresa energètica: el problema de l'eficiència.

1.1.2. Pobresa energètica a Barcelona

Per a analitzar el problema de la pobresa energètica a Barcelona, i concretament al barri del Raval, s'han utilitzat els resultats de l'Enquesta de Salut de Barcelona feta el 2016 per l'Agència de Salut Pública de Barcelona [3]. En aquest informe, entre altres coses, es va utilitzar l'índex compost de pobresa energètica que depèn de tres factors: incapacitat de mantenir l'habitatge a una temperatura adequada, endarreriment en el pagament de factures i presència de goteres, humitats o floridura a l'habitatge.

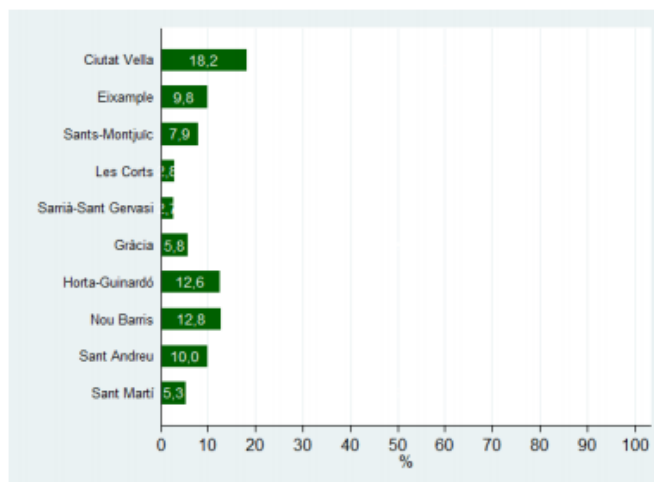


Figura 1: Pobresa energètica segons districtes [3].

Segons l'informe, la pobresa energètica afecta al 9,1% de la població. A més, afecta en major grau a les dones de 75 a 84 anys (17%). Respecte a els districtes, la freqüència més gran es dona a Ciutat Vella (18,2%), seguit per Horta-Guinardó, Nou Barris, i Eixample amb valors al voltant del 10%. Veure Figura 1.

A partir d'aquestes dades, també es fan paleses les desigualtats socials i econòmiques que presenta la ciutat, ja que aquest índex és 5 vegades menor al districte de les Corts. La causa de l'alt valor de l'índex a Ciutat Vella pot ser la mala qualitat i l'antiguitat de les edificacions i el baix poder adquisitiu.

Aquests resultats es poden reafirmar comparant-los amb el registre de persones ateses al taulell dels PAE (Punts d'Assessorament Energètic) entre gener i octubre del 2017 desagregades per districtes. Es pot veure que els PAE que atenen més persones respecte a la població total del districte són els de Ciutat Vella (85 persones per 10.000 habitants) i Nou Barris (75 per 10.000 habitants), i que aquests recullen també un terç (un 12 i un 18% respectivament) del total de 6.915 persones ateses per PAE fins a l'octubre del 2017 [4].

1.1.3. Barri del Raval

Des del punt de vista administratiu, el barri del Raval forma part del districte de Ciutat Vella. Amb una superfície de 1,1km², segons dades del gener del 2018, té 47605 habitants. Un 50% de la població té nacionalitat estrangera, la majoria de Pakistan, Filipines i Bangladesh, amb aquest ordre. El 2016, la renda familiar disponible per habitant estava a 74,6 punts, tenint com a base Barcelona (100 punts) [5]. Així doncs, si segons l'IEC (l'institut d'Estadística de Catalunya) la renda familiar disponible per habitant a Barcelona era de 17 milers d'euros anuals [6], al barri del Raval seria de 12,7 milers d'euros anuals.

L'institut d'Estadística de Catalunya defineix "La renda familiar disponible bruta (RFDB) "com la macromagnitud que mesura els ingressos de què disposen els residents d'un territori per destinar-los al consum o a l'estalvi. Aquesta renda no només depèn dels ingressos de les famílies directament vinculats a la retribució per la seva aportació a l'activitat productiva (remuneració d'assalariats i excedent brut d'explotació), sinó que també està influïda per l'activitat de l'Administració pública mitjançant els impostos i les prestacions socials.

Les ciutats europees, concretament els centres històrics, s'han vist perjudicades per una transformació econòmica profunda. A causa de la menor activitat industrial, el sector terciari ha guanyat protagonisme incidint directament a barris com el Raval. Per tant, des d'aquest moment, es cerca la revalorització dels centres històrics a partir d'intervencions per part de les autoritats competents en matèria d'urbanisme. Paral·lelament, a la població tradicional dels nuclis antics, constituïts majoritàriament per classes populars, se li ha sumat nous residents procedents de l'emigració transnacional [7].

Des de l'òptica antropològica, Gaspar Maza, Gary McDonogh i Joan Pujadas, ja opinaven el 2002 que la política de regeneració el Raval estava mal plantejada, ja que s'havien fet intervencions que havien perjudicat el barri, tant als seus habitants com el patrimoni urbà i cultural [8]. Encara ara, aquestes reformes només van dirigides a atreure el turisme i no en millorar les condicions de vida dels habitants del Raval Així que, no és d'estranyar veure edificis i carrers en mal estat, un reflex de les condicions precàries en l'àmbit social i econòmic del barri.

1.1.4. Oasiurbà

L'associació Oasiurbà neix arran de la col·laboració d'altres agrupacions com: Base-A, Arquitectes de Capçalera i Bioarquitectura Mediterrània. És una associació sense ànim de lucre que treballa al barri del Raval per a restablir les condicions mínimes d'habitabilitat, salubritat i seguretat en aquelles persones en risc d'exclusió residencial i amb pocs recursos.

L'equip està format per professionals del món de l'arquitectura, arquitectes, enginyers,

treballadors socials, periodistes i fotògrafs. L'objectiu principal és oferir una resposta integral a les problemàtiques derivades d'un estat deficient o d'inseguretat a la llar.

Ara mateix, l'entitat es troba en procés de realitzar diferents intervencions a l'immoble del carrer de Sant Ramon. Així mateix, des d'Oasiurbà s'està treballant per aconseguir tirar endavant projectes en dos nivells: la rehabilitació integral de la finca i les microintervencions a l'interior dels habitatges per recuperar les condicions mínimes d'habitabilitat [9].

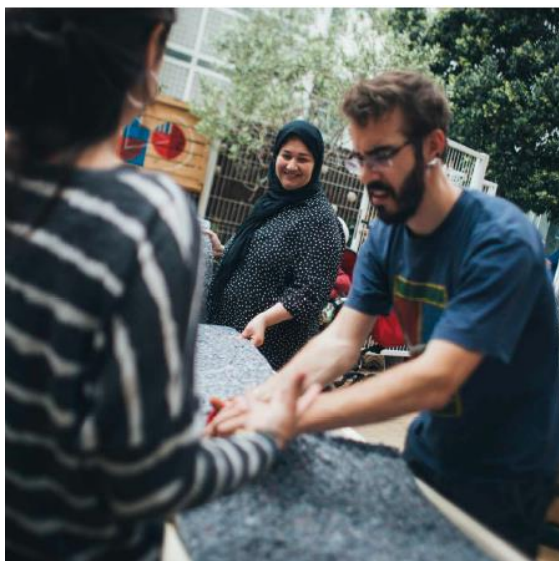


Figura 2: Fotografia proporcionada per Oasiurbà.

1.2 Origen del projecte

L'entitat Oasiurbà es troba en procés de realitzar diverses intervencions a un immoble del carrer de Sant Ramon: el número 2, també nomenat per l'associació Oasi Chebika. Aquest edifici, de més de 100 anys d'antiguitat, està situat al cor de la zona més degradada del barri i, al mateix temps, a una posició emblemàtica: davant la Filmoteca de Catalunya, al costat de la Rambla del Raval (veure Figura 3). Tot i que l'edifici és de bona qualitat arquitectònica, en els darrers anys ha caigut en un fort estat de degradació i debilitament per culpa dels propietaris que eludeixen les seves responsabilitats de manteniment, fins al punt que han sigut interpellats per part de l'Administració mitjançant una Ordre de Conservació.

En el nostre projecte, formem part d'un programa de microintervencions a l'interior dels habitatges de l'edifici. Concretament, el nostre cas d'estudi consisteix a la millora energètica, en termes de confort tèrmic, del 4t 1a; sempre des de l'òptica de l'eficiència: per una part estalviant recursos energètics, i per altra trobant les solucions més òptimes en un triple eix de qualitat, accessibilitat i sostenibilitat.

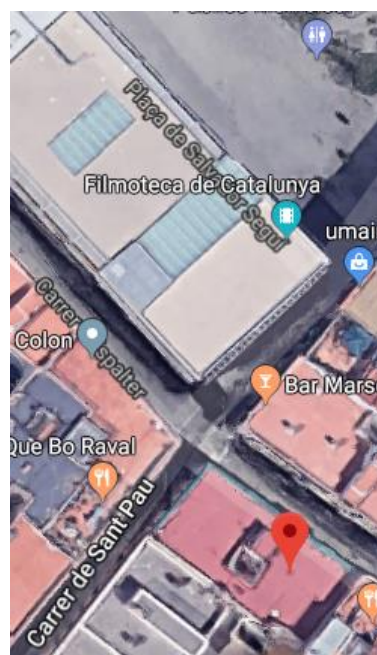


Figura 3: Situació del pis (GoogleMaps).

1.3 Objectius del projecte

L'objectiu del treball consisteix a construir un model tridimensional CFD d'un habitatge, mitjançant ANSYS Fluent, per a posteriors anàlisis energètiques. En altres paraules, es basa a elaborar un *bessó virtual*: una rèplica d'un pis concret que, amb les condicions de contorn adients, simuli en forta exactitud el seu tarannà energètic. Posteriorment, amb el seguiment d'altres voluntaris, s'hauran de proposar solucions que s'aplicaran al *bessó virtual*, i esbrinar quines podrien ser les millors que es podrien dur a terme en una futura intervenció. Per tant, aquesta metodologia permet trobar les solucions més òptimes sense malgastar recursos materials, és a dir de la manera més eficient possible. Finalment, quan s'hagi fet l'estudi a diversos habitatges, podrem interpolar solucions en pisos en condicions similars –mateixa tipologia, orientació o posició-. A llarg termini, l'objectiu d'aquests estudis és elaborar un catàleg amb solucions a habitatges concrets de la forma més eficient possible: estalviant recursos i dins les possibilitats econòmiques.

En el nostre cas, hem fet servir el programa ANSYS Fluent, que permet dividir el problema en quatre parts: Elaboració de la geometria, Elaboració d'una malla òptima, Configuració de les condicions de contorn i Validació dels resultats.

1.4 Abast del projecte

El treball s'ha limitat en elaborar un model funcional del pis 4t 1a de l'edifici ubicat al carrer Sant Ramon 2, optimitzant la densitat de malla per minimitzar el temps de càlcul i els recursos de computació. Per assolir aquests objectius, s'ha encarat en dues fases: una primera d'introducció i familiarització i una segona de l'estudi del cas concret.

Des d'un primer moment, es va creure convenient fer unes setmanes de preparació abans de començar a estudiar el cas. Aquesta etapa, no forma part estrictament de la raó de ser del projecte, però és totalment necessària abans de començar amb l'estudi. Es traca de familiaritzar-me en la manera de treballar de l'ONG, conèixer el cas en concret i formar-se per utilitzar ANSYS Fluent.

Per tant, recordant que el projecte és una col·laboració amb l'ONG Oasiurbà, el primer pas va ser fer-se voluntari i adaptar-se a la seva manera de treballar. Es va rebre una formació sobre com funciona l'associació, els seus objectius i quins reptes es plantejaven. A partir d'aquell moment, es va acordar un dia en què es podria assistir al seu local, per treballar el cas concret en coordinació amb els arquitectes, que facilitaven tota la informació necessària.

Finalment, dins d'aquest bloc de preparació, calia unes lliçons formatives del programa ANSYS, Fluent. Llavors, es varen fer 4 sessions on construïrem una geometria bàsica d'una cas concret, li aplicarem una malla i estudiarem el seu comportament energètic.

La segona fase, que ja forma part pròpiament de l'estudi, va constituir en rebre tota la informació necessària pel meu cas: la geometria del pis i les condicions de contorn. Ja amb tota aquesta informació (plànols en planta i interiors, materials i orientació del pis) era necessari validar-ho. Per tant, el següent pas va ser fer una visita al pis i conèixer els inquilins. Algunes mesures dels plànols, com amplada de les finestres i detalls en la tipologia van ser validades en aquesta visita, a més de corroborar les deficiències que presenten els habitatges . Per altra banda, també és totalment necessari conèixer el cas real en el qual es treballa per guanyar un extra de motivació personal i sentir-se part d'un projecte que permet ajudar que la gent s'empoderi millorant les seves condicions vitals.

A partir d'aquest moment, es va començar a treballar en l'elaboració del *bessó virtual*: confecció d'una geometria vàlida juntament amb un mallat eficient que permeti realitzar simulacions energètiques.

2. Marc Teòric

2.1 Confort tèrmic i eficiència energètica

[10]

L'informe *Rehabilitación exprés para hogares vulnerables* apunta que un dels factors de la pobresa energètica de Barcelona, també podria ser l'antiguitat dels habitatges: un 65% és anterior al 1980, per tant el seu comportament energètic podria ser molt millorable. L'estudi també il·lustra les maneres en què els habitatges de la ciutat busquen el confort tèrmic. En el cas de l'hivern, un 60% utilitza sistemes permanents de calefacció –com gas canalitzat-, un 30% sistemes elèctrics i un 10% no té cap sistema. Respecte a l'estiu, un 80% dels habitatges no tenen cap sistema de refrigeració i un 24% no aconsegueix mantenir la llar fresca.

2.1.1. Clima

La construcció o les mesures d'intervenció dels edificis s'han d'adequar a les seves característiques climàtiques. El climograma de Givoni és essencial per determinar aquestes característiques. Per mantenir un confort tèrmic o benestar, s'ha de trobar un equilibri tèrmic entre el cos humà i l'entorn. Per tant, és totalment necessari saber quins són els factors ambientals que provoquen l'equilibri. En aquest cas, el climograma de Givoni és la millor eina.

2.1.2. Climograma de Givoni

Amb aquest mètode s'elabora una gràfica en què l'eix d'abscisses és la temperatura de bulb sec, les ordenades la tensió parcial de vapor d'aigua contingut, les línies psicomètriques la humitat relativa i per sobre de la línia d'humitat màxima, la temperatura de bulb humit.

En el climograma es defineixen unes zones -a partir d'un màxim i un mínim de cada paràmetre- on es plasma la zona de confort, la zona de confort permesa i les solucions que s'haurien d'aplicar en cas que s'estigui fora d'aquestes zones. Veure Figura 4.

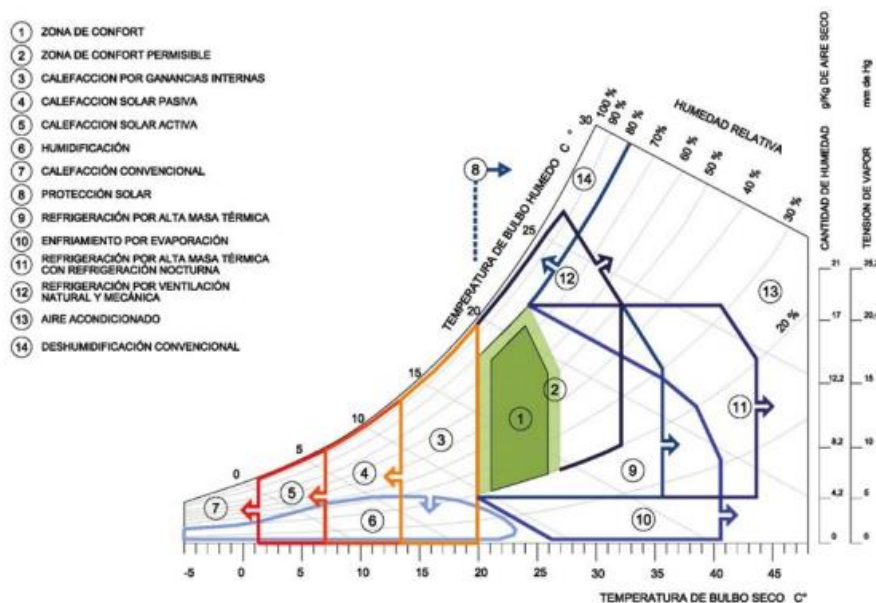


Figura 4: Climograma de Givoni [10].

2.1.3. Clima a Barcelona

A partir de dades d'EnergyPlus [11] s'han trobat les condicions climàtiques de Barcelona (veure Figura 5). Una dada interessant és que, a causa de la influència del mar Mediterrani, la humitat relativa mitjana pràcticament no varia durant tot l'any (entre 67 i 74%). Llavors, analitzant el climograma de Givoni, observem que el factor que més influència té per determinar la zona de confort és la temperatura. Per tant, acceptarem que la zona de confort estarà entre una temperatura de 20 i 26 °C.

Amb les dades de temperatura mitjana de Barcelona, notem que durant els mesos: gener, febrer, març, abril, novembre i desembre; no s'arriba a aquesta temperatura mitjana. En canvi, tot i que durant els mesos: juny, juliol, agost i setembre; s'està en la majoria d'hores dintre de l'espectre, es sobrepassen en les hores més caloroses.

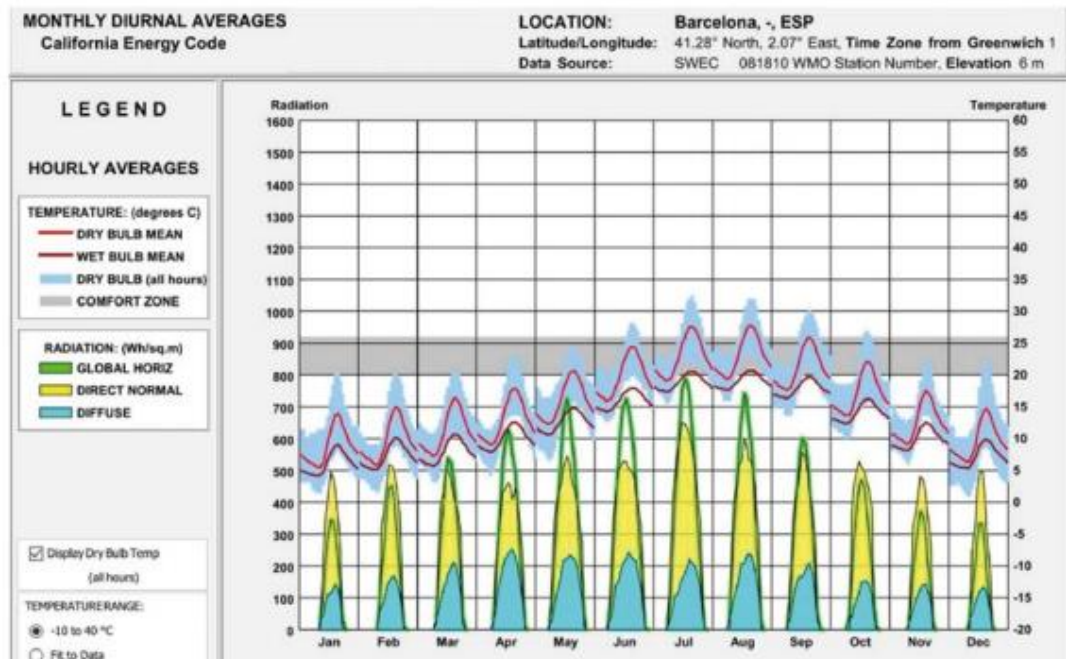


Figura 5: Valors mitjans mensuals a Barcelona [10], Font: Climate Consultant.

2.1.4. Solucions tèrmiques

A partir del diagrama de Givoni, podem trobar quines són les solucions que s'haurien d'aplicar durant l'any per assolir el confort tèrmic (Figura 6):

- Un 14,7% d'hores de l'any s'està en condicions de confort.
- Un 12,7% necessita protecció solar.
- Un 24,1% ventilació natural o mecànica.
- Un 14,7% amb l'aprofitament de la inèrcia tèrmica.
- Un 0,4% Refredament per evaporació.
- Un 7,6% deshumidificació
- Un 36,1% amb guanys interns.
- Un 35,6% calefacció solar passiva.
- Un 24,5% calefacció convencional.

Com podem observar, aquestes estratègies sumen més d'un 100% d'hores. Això, és perquè les solucions no són exclusives, sinó que varies d'elles poden servir en un mateix moment.

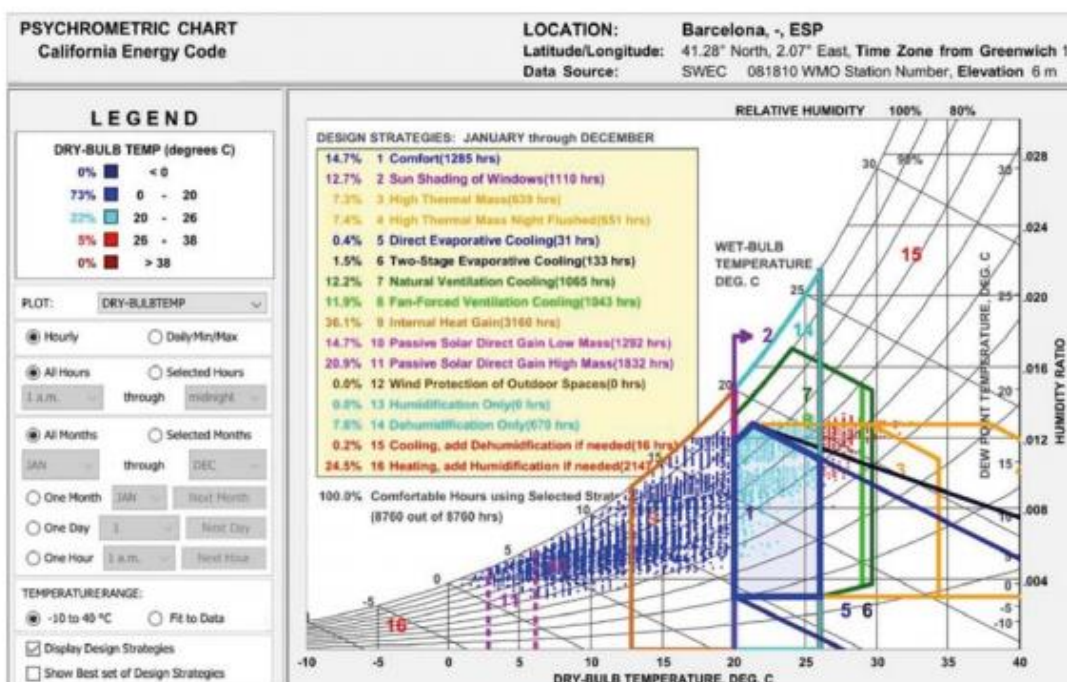


Figura 6: Climograma de Givoni amb les possibles estratègies a Barcelona [10], Font: Climate Consultant.

A la següent taula hi trobem totes aquestes estratègies ponderades segons la necessitat d'aplicació a Barcelona, i a altres ciutats espanyoles, depenent dels mesos de l'any:

LOCALIDAD	ESTRATEGIAS DE DISEÑO							
	Protección solar	Ventilación	Inercia	Enfriamiento por evaporación	Deshumidificación	Ganancias internas	Captación solar	Calefacción convencional
Meses cálidos	Barcelona	■	■	■	■	■	■	■
	A Coruña	■	■	■	■	■	■	■
	Madrid	■	■	■	■	■	■	■
	Sevilla	■	■	■	■	■	■	■
Meses intermedios	Barcelona	■	■	■	■	■	■	■
	A Coruña	■	■	■	■	■	■	■
	Madrid	■	■	■	■	■	■	■
	Sevilla	■	■	■	■	■	■	■
Meses fríos	Barcelona	■	■	■	■	■	■	■
	A Coruña	■	■	■	■	■	■	■
	Madrid	■	■	■	■	■	■	■
	Sevilla	■	■	■	■	■	■	■

■ Necesidad muy alta
 ■ Necesidad alta
 ■ Necesidad media
 ■ Necesidad baja
 No necesaria

Figura 7: Estratègies de disseny per mesos segons ciutat [10].

Tot i que analitzar quines haurien de ser aquestes intervencions no forma part del nostre estudi, es mencionaran algunes d'elles per il·lustrar millor les estratègies per al confort tèrmic.

- Aïllament de murs amb EPS (0,038 – 0,043 W/mK) .
- Revestiment al sostre amb placa de guix o EPS.
- Pintar de color blanc la coberta.
- Substitució de vidres de doble cristall.
- Col·locació de borlets.
- Para-sols .

2.2. Transferència de calor

[12]

Definim la calor (Q) com un tipus d'energia que es transfereix a causa d'un gradient o diferència de temperatures. Així que en física tèrmica, la transferència de calor és el pas de l'energia tèrmica d'un cos calent a un de més fred. El mode de com es transfereix depèn de l'estat d'agregació de la matèria, d'aquesta manera en podem definir tres, que es poden manifestar individualment o com a combinació d'ells. Aquests són: la conducció, la convecció i la radiació.

2.2.1 La conducció

La transferència de calor mitjançant la conducció és degut al pas d'energia de les molècules o àtoms més energètics a menys energètics per contacte directe. Pel segon principi de la termodinàmica, si en un sistema hi ha una diferència de temperatures, en un increment de temps Δt , es transferirà un diferencial de calor en el sentit de les temperatures decreixents.

Llavors, podem definir una potència tèrmica com a: $q = \frac{\delta Q}{\Delta t}$ Eq 2.2.1

Segons l'equació de Fourier –que fa una definició experimental- aquesta potència tèrmica és directament proporcional a l'àrea, a la conductivitat tèrmica i a la diferència de temperatures de dos punts, i inversament proporcional a la distància entres punts. De forma diferencial,

$$q = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad \text{Eq 2.2.2} \quad \text{on } \lambda \text{ és la conductivitat i } A \text{ és l'àrea.}$$

A més, podem definir el flux de potència tèrmica –on l'àrea depèn de x, com a $\left[\frac{q}{A} \right]_x$.

Fent una analogia de la llei d'Ohm $I = \frac{\Delta V}{R}$ Eq 2.2.3,

per una diferència de voltatge definida –o de temperatures- , la intensitat –o potència- serà major com més petita sigui la resistència. Aquesta resistència, en el nostre cas tèrmica, dependrà de la conductivitat del material λ i de la geometria del problema.

Respecte a la conductivitat tèrmica, podem il·lustrar els següents exemples:

$$\lambda_{Cu} = 390 \quad \lambda_{Al} = 160 \quad \lambda_{Fe} = 70 \quad \lambda_{vidre} = 0,78 \quad \lambda_{aïllant} = 0,2 \quad \lambda_{aire} = 0,02$$

Notem que la del coure és 500 vegades més gran que la del vidre i 19500 vegades la de l'aire. Per tant, és palès que conèixer les conductivitats dels materials és clau per controlar la resistència tèrmica.

La geometria també juga un paper important, així, per exemple, després de fer el càlcul integral a un volum de control arribem a la següents equacions:

- Paret plana : $q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L}{\lambda A}} = \frac{\Delta T}{R_{cond}}$ Eq 2.2.4

- Paret cilíndrica: $q = \frac{T_i - T_o}{\frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi\lambda L}} = \frac{\Delta T}{R_{cond}}$ Eq 2.2.5

- Paret esfèrica: $q = \frac{T_i - T_o}{\frac{r_o - r_i}{4\pi\lambda r_o r_i}} = \frac{\Delta T}{R_{cond}}$ Eq 2.2.6

2.2.1.1 Aïllants tèrmics

Ens referim a aïllants tèrmics a aquells materials que ofereixen una gran resistència-tèrmica a causa de la seva baixa conductivitat ($\leq 0,2 \text{ W/mK}$). Aquests són utilitzats per dificultar la transferència de calor i, per tant, mantenir la temperatura d'un sistema. En l'àmbit de la construcció, són utilitzats per mantenir el confort tèrmic a l'interior dels edificis. Llavors, és interessant conèixer les propietats dels materials aïllants per poder seleccionar el més òptim pel nostre cas [13].

Aprofitant la baixa conductivitat de l'aire, es produeixen materials -com fibres- amb una fracció important d'aire. D'aquesta manera, els materials aïllants solen tenir baixa densitat. Per altra banda, la conductivitat tèrmica d'un material també depèn de la humitat a causa del moviment de l'aigua per capil·laritat dins del material porós.

2.2.2. La convecció

La transferència de calor per convecció es compon d'una conducció a nivell molecular i un moviment global del fluid. El fluid està a una temperatura mitjana de T_∞ i el sòlid en contacte a T_0 . La temperatura global del fluid T_∞ no es modificarà, però sí la local que està en contacte amb el sòlid T_0 . Per tant, aquesta diferència de temperatures també provoca una diferència de densitats que, pel principi d'Arquímedes, el fluid no pertorbat (T_∞, ρ_∞) realitzi una empenta que fa que el fluid entri localment en moviment. Aquest procés de renovació del fluid és el que anomenem convecció natural. Si disposem d'elements mecànics d'impulsió –com ventiladors o bombes- es produirà convecció forçada.

La potència tèrmica en la convecció es definirà de la mateixa manera, el què canviarà serà la resistència tèrmica que segons la llei de refredament de Newton:

$$q_{conv} = h_c A (T_0 - T_\infty) \quad \text{Eq 2.2.7}$$

O el que és el mateix: $q_{conv} = \frac{T_0 - T_\infty}{\frac{1}{h_c A}} = \frac{T_0 - T_\infty}{R_{conv}} \quad \text{Eq 2.2.8}$

Llavors la resistència tèrmica dependrà de l'àrea en contacte amb el fluid i del coeficient de convecció h_c . Aquest últim depèn dels diferents processos convectius (veure Figura 8).

Mecanisme	Fluid	h_c , W/(m ² K)
<i>Canvi de fase</i>	Condensació de vapor d'aigua	5000 – 100000
	Aigua bullent	2500 – 25000
<i>Convecció forçada</i>	Metalls líquids	500 – 20000
	Aigua	250 – 12000
	Orgànics viscosos	50 – 3000
	Aire	15 – 300
<i>Convecció natural</i>	Metalls líquids	150 – 1200
	Aigua	100 – 850
	Orgànics viscosos	5 – 100
	Aire	5 – 20

Figura 8: Taula de diferents coeficients de convecció [12].

Així doncs, la convecció forçada té uns coeficients h_c majors que la convecció natural. Això es tradueix en una resistència tèrmica més petita, per tant, un mateix flux de calor tindrà una major diferència de temperatures; o cosa equivalent, es podrà dissipar més calor. Els mecanismes de convecció forçada es solen utilitzar quan es necessari refredar un sistema.

2.2.3. La radiació

Qualsevol cos emet radiacions electromagnètiques. Anomenem radiació tèrmica a les que tenen una longitud d'ona entre 0,1 i 100 μm . Quan una unitat de potència radiant incideix sobre una superfície, una part és absorbida, una altra reflectida i una altra es transmet entremig del sòlid.

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad \text{Eq 2.2.9,} \quad \text{on } \alpha \text{ és l'absorbància, } \rho \text{ és la reflectància i } \tau \text{ és la transmitància.}$$

Anomenarem cos negre a aquell que absorbeix tota l'energia radiant sense dissipar-la, transmetre ni reflectir-la. És un concepte teòric que serveix per comparar l'emissió i l'absorció d'un sòlid qualsevol i una superfície molt més gran –és el què anomenarem l'univers del sistema-. Aquest univers roman constant i no es veurà afectat pel problema.

Llei d'Stefan-Boltzman:

Aquesta llei s'aplica quan una superfície està envoltada per una altra molt més gran considerada com a un cos negre.

$$q = \varepsilon A \sigma (T_{\infty}^4 - T^4) \quad \text{Eq 2.2.10,} \quad \text{on } \sigma = 5,67E - 08 \frac{W}{m^2K^4} \text{ i } \varepsilon \text{ l'emissivitat de la superfície}$$

2.2.4. Configuracions comunes

Per la resolució de problemes utilitzarem l'equació fonamental de la calor:

$$\nabla^2 T + \frac{\dot{g}}{\lambda} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad \text{Eq 2.2.11,} \quad \text{on } \alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$$

$$\text{Que en coordenades cartesianes: } \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{g} = \rho c_p \frac{dT}{dt} \quad \text{Eq 2.2.12}$$

- Així, per exemple, en un sistema unidimensional, en règim estacionari i sense generació: $\frac{d^2 T}{dx^2} = 0$. Aplicant la llei de Fourier (Eq 2.2.2), $\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q}{A} \right) = 0$, sabem que el flux potencial serà constant en tots els punts:

$$\left[\frac{q}{A} \right]_0 = \left[\frac{q}{A} \right]_x = \left[\frac{q}{A} \right]_L \quad \text{Eq 2.2.13}$$

- Si suposem un sistema unidimensional en règim estacionari i generació constant: $\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{\dot{g}}{\lambda} = 0$, aplicant la llei de Fourier (Eq 2.2.2), $\frac{d}{dx} \left(\frac{q}{A} \right) = \dot{g}$, o el què és el mateix:

$$\left[\frac{q}{A} \right]_{sort} - \left[\frac{q}{A} \right]_{entr} = \dot{g} \quad \text{Eq 2.2.14}$$

“El flux de la sortida és igual al de l'entrada més el què es genera”.

Les equacions Eq 2.2.13 i Eq 2.2.14, també considerades balanços de calor, són les més utilitzades per a la resolució de problemes de caràcter estacionari. Així doncs, coneixent el flux de calor que es transfereix entre dues superfícies i la temperatura d'una d'elles, podem aïllar la temperatura restant. Altament, si coneixem les temperatures d'ambdues superfícies, podem trobar el flux de calor.

A l'equació Eq 2.2.2 hem definit la calor de la conducció en funció de la diferència de temperatures i d'una resistència tèrmica. Així i tot, aquesta definició, purament teòrica, no és de gran utilitat per a resoldre problemes de transferència de calor, i més concretament en el camp de l'edificació. La majoria de problemes, tenen la complexitat en la conducció, és per això que ens centrarem en com simplificar-ho per a configuracions comunes.

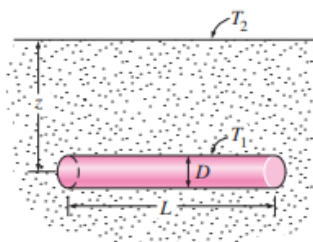
La raó de transferència de calor es pot expressar d'aquesta manera [15]:

$$Q = S\lambda(T_1 - T_2), \quad \text{Eq 2.2.15} \quad \text{on } S \text{ és el factor de forma de a la conducció, el qual té dimensions de longitud.}$$

El factor de forma S només depèn de la configuració geomètrica. Per això mateix, existeixen taules amb diferents valors de S depenent de la tipologia del problema. A la Figura 9 hi ha alguns exemples que ens podríem trobar al camp de l'edificació:

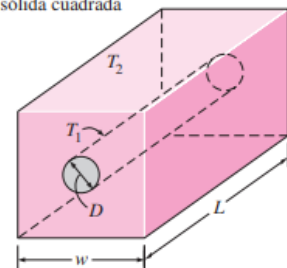
- 1) Cilindro isotérmico de longitud L enterrado en un medio semiinfinito ($L \gg D$ y $z > 1.5D$)

$$S = \frac{2\pi L}{\ln(4z/D)}$$



- 6) Cilindro isotérmico circular de longitud L en el centro de una barra sólida cuadrada de la misma longitud

$$S = \frac{2\pi L}{\ln(1.08w/D)}$$

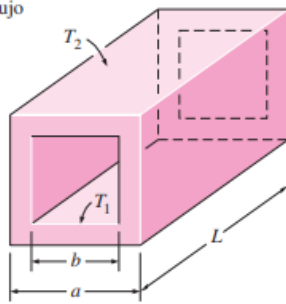


10) Un paso cuadrado para flujo
 a) Para $a/b > 1.4$,

$$S = \frac{2\pi L}{0.93 \ln(0.948ab)}$$

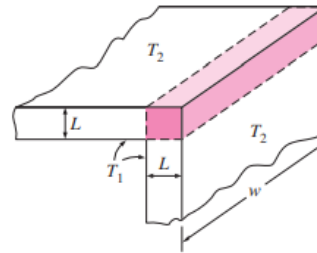
b) Para $a/b < 1.41$,

$$S = \frac{2\pi L}{0.785 \ln(ab)}$$



13) Borde de dos paredes adyuntas de igual espesor

$$S = 0.54 w$$



14) Esquina de tres paredes de igual espesor

$$S = 0.15 L$$

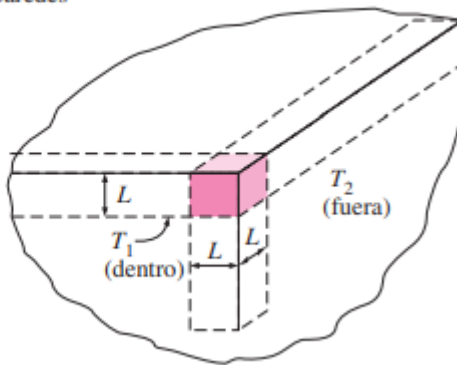
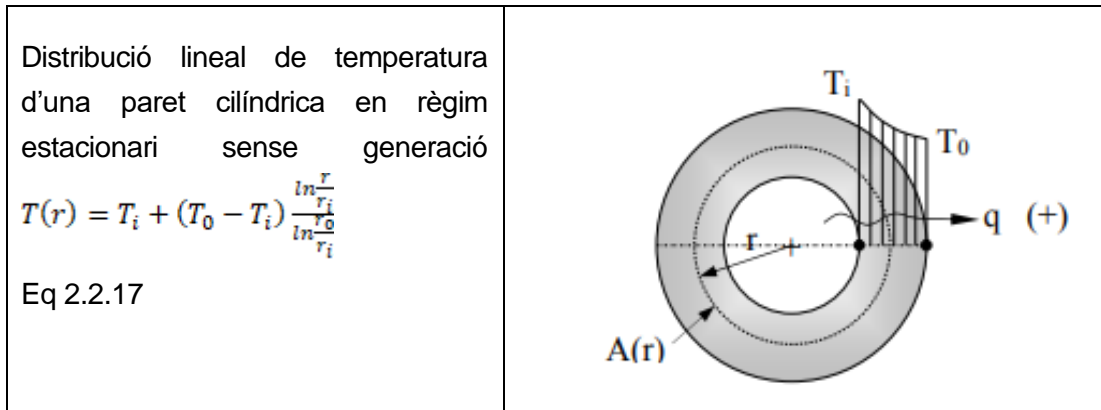


Figura 9: Diferents configuracions amb les seves respectives S [14].

A més a més, altres vegades també resulta útil conèixer la distribució de temperatures d'una paret, per exemple. A la literatura, hi trobem expressions també depenent de la configuració del problema. Aquestes s'aïllen plantejant l'equació fonamental de la calor, establint les condicions de contorn i utilitzant l'equació de Fourier.

Exemples:

<p>Distribució lineal de temperatura d'una paret plana en règim estacionari sense generació</p> $T(x) = T_1 - \left(\frac{T_1 - T_2}{L}\right) x$ <p>Eq 2.2.15</p>	
--	--



2.3 Computacional Fluid Dynamics (CFD)

2.3.1. Funcionament

[15]

Històricament, el desenvolupament del CFD (Computational Fluid Dynamics) es dona entre el 1960 i el 1970 a causa de les necessitats de la comunitat aeroespacial. Posteriorment, a causa de la crisi del petroli dels anys 70, que obligava a estalviar carburant, la tècnica es va començar a utilitzar a la indústria automobilística, ja que l'aerodinàmica jugava un paper important. Tant com s'anava perfilant aquesta metodologia d'estudi, la indústria manufactura i l'enginyeria civil s'hi endinsaren, per exemple en l'estudi de rius i llacs, en el cas dels segons. Aquesta eina també és útil dins l'enginyeria naval i, com s'aplica en aquest estudi, per a l'estudi fluidodinàmic i tèrmic en termes de confortabilitat energètica [16].

El CFD serveix per substituir les integrals o derivades parcials en equacions discretitzades que es resolen mitjançant mètodes numèrics i algorismes. Aquest mètode permet trobar solucions pràcticament idèntiques al càlcul infinitesimal o analític, sempre i tant es tingui a disposició d'un ordinador que permeti emmagatzemar milers de dades obtingudes a partir de múltiples càlculs. Així doncs, sense l'avenç de la tecnologia que promogui un ordinador d'alta capacitat d'emmagatzematge i ràpida velocitat de càlcul, juntament amb un sofisticat software de configuració del model, el CFD deixa de ser útil i factible.

El mètode que utilitza el CFD consisteix a discretitzar una regió creant una malla, formant així petits volums de control. Després, en cadascun d'aquests volums es solucionen les equacions definides en el model físic, de forma que realment es resol una matriu algebraica a cada cel·la de forma interactiva fins que el residu és suficientment petit. El càlcul en CFD es divideix en 3 processos:

1. Preprocès:
 - 1.1 Utilitzant qualsevol CAD de disseny es crea la geometria del problema, que posteriorment s'importarà al software de càlcul amb el format adient.
 - 1.2 La geometria és dividida en cel·les, conegudes com a malles. Aquesta malla està formada per elements hexaèdrics, tetraèdrics, prismàtics, piramidals, polièdrics o la combinació d'ells.
 - 1.3 S'estableix el model físic amb les equacions de moviment, les 4 de conservació, la radiació, les d'entalpia, etc.
 - 1.4 Es defineixen les condicions de contorn: comportament del fluid en les regions, propietats del fluid i de les superfícies.
2. Simulació: es resolen les equacions de forma iterativa.
3. Posprocès: Les dades obtingudes són analitzades quantitativament o qualitativament utilitzant eines de disseny com gràfiques o eines de visualització.

En aquest treball s'ha fet servir ANSYS Fluent, que disposa de resolució de problemes mitjançant CFD.

2.3.2. Mètodes de resolució

Existeixen diferents mètodes de resolució mitjançant softwares de càlcul. Aquests són: el mètode de volums finits, el mètode d'elements finits i el mètode de diferències finites. L'ANSYS Fluent utilitza el primer: el mètode de volums finits.

El mètode de volums finits (FVM) és el més estès dins el CFD, perquè és el més ràpid en càlcul. En l'FVM es redefeixen les equacions diferencials que governen el problema en equacions algebraiques. Com que hem dividit la geometria en regions relativament petites a partir d'una malla, podem assumir les derivades respecte a les coordenades espacials com a increments.

$$\frac{\partial B}{\partial x_i} = \frac{\Delta B}{\Delta x_i} \quad \text{Eq 2.3.1,} \quad \text{on B és una variable en general.}$$

Així, per exemple, es poden aplicar les equacions de Navier Stokes –que s'explicaran a continuació- de forma incremental, resolent el sistema de forma matricial. Evidentment, aquesta aproximació serà més bona com més elements tingui la malla. Tot i que l'*art* del CFD és trobar resultats prou bons amb una densitat de malla el més petit possible.

Ara cal saber, quines són les equacions diferencials que defineixen el moviment dels fluids, que en definitiva són les que es resolen.

2.3.3. Comportament dels fluids

[17]

El moviment del fluid es pot analitzar des de dos punts de vista: amb una descripció detallada del flux en cada punt (anàlisi lagrangiana) o realitzant un balanç entre el fluid que entra i el que surt a una regió limitada d'espai (anàlisi euleriana). Per tant, hi trobem dues metodologies, iguals en importància però utilitzades en diferents tipologies de problemes.

L'anàlisi amb volums de control és vàlid per qualsevol fluid, tot i que es basa en propietats mitjanes del contorn. Així que és una eina molt valuosa per estudis de geometries simplificades que no requereixen resultats exactes, per exemple l'estudi de conductes. En canvi la descripció diferencial pot ser utilitzada per qualsevol problema i geometria d'alta complexitat, i moltes vegades només es pot resoldre de forma numèrica a partir de càlcul computacional (CFD).

Ambdues anàlisis segueixen quatre lleis que estableixen què ocorre quan hi ha una interacció entre el sistema i l'entorn.

1. Conservació de la massa: Aquesta llei és una pròpia definició del sistema, una quantitat fixa de massa. $m_{sis} = ct \quad \frac{dm}{dt} = 0$ Eq 2.3.2
2. Conservació de la quantitat de moviment: Segons la segona llei de Newton si l'entorn estableix una força al sistema, la seva massa s'accelera. Dit d'una altra manera, si el sistema rep la mateixa força resultant, es conserva la quantitat de moviment.

$$F = ma = m \frac{dV}{dt} = \frac{d(mV)}{dt} \quad \text{Eq 2.3.3}$$

3. Conservació del moment cinètic: Si l'entorn exerceix un moment resultant sobre el centre de masses, es produirà una rotació.

$$M = \frac{dH}{dt} \quad \text{Eq 2.3.4,} \quad \text{on H és el moment cinètic.}$$

4. Conservació de l'energia: D'acord amb la primera llei de la termodinàmica, si es comunica una calor dQ al sistema o aquest realitza un treball dW sobre l'entorn, l'energia del sistema ha de canviar dE seguint l'equació (Eq 2.3.5 o 2.3.6):

$$\delta Q - \delta W = dE \quad \text{Eq 2.3.5} \quad \dot{Q} - \dot{W} = \frac{dE}{dt} \quad \text{Eq 2.3.6}$$

En aquest treball, només s'explicarà l'anàlisi diferencial, ja que és de la nostra utilitat.

2.3.3.1. Anàlisi diferencial

Les mateixes quatre lleis es poden aplicar a un sistema infinitesimal. Aquestes equacions diferencials, són molt difícils de solucionar i es coneixen molt poc les seves propietats matemàtiques, però resulten molt útils per a resoldre problemes a partir de mètodes numèrics. En el nostre treball, s'utilitzaran 3 d'aquestes 4 equacions: la conservació de la massa, la conservació de la quantitat de moviment i la conservació de l'energia.

Conèixer l'acceleració és fonamental per resoldre problemes a fluidodinàmics:

$$a = \frac{dV}{dt} = i \frac{du}{dt} + j \frac{dv}{dt} + k \frac{dw}{dt} \quad \text{Eq 2.3.7}$$

Com que cada component de la velocitat depèn de les variables x , y , z i t ; a partir de la regla de la cadena, podem trobar l'acceleració total de forma compacta:

$$a = \frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + \left(u \frac{\partial V}{\partial x} + v \frac{\partial V}{\partial y} + w \frac{\partial V}{\partial z} \right) \quad \text{Eq 2.3.8}$$

I es defineix l'acceleració local com: $\frac{\partial V}{\partial t}$, i l'acceleració convectiva com: $\left(u \frac{\partial V}{\partial x} + v \frac{\partial V}{\partial y} + w \frac{\partial V}{\partial z} \right)$

1. Equació diferencial de la conservació de la massa:

Considerarem un volum de control infinitesimal fix. El flux a través de cada cara és aproximadament unidimensional, llavors la relació de conservació de la massa queda (Eq 2.3.1):

$$\int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \sum_i (\rho_i A_i V_i)_{sort} - \sum_i (\rho_i A_i V_i)_{entr} = 0 \quad \text{Eq 2.3.9}$$

La integral del transitori es pot definir com:

$$\int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = \frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz$$

A més, els fluxos d'entrada i sortida es poden expressar així:

Cares	Flux a l'entrada	Flux a la sortida
x	$\rho u dy dz$	$\left[\rho u + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) dx \right] dy dz$
y	$\rho v dx dz$	$\left[\rho v + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v) dy \right] dx dz$
z	$\rho w dx dy$	$\left[\rho w + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w) dz \right] dx dy$

Aplicant-ho, l'expressió queda:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) dx dy dz + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v) dx dy dz + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w) dx dy dz = 0$$

Eq 2.3.10

I simplificant $dx dy dz$:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w) = 0$$

Eq 2.3.11

Si entrem a la guia d'ANSYS [18], ens adonem que generalitza una mica més l'equació Eq 2.3.11, ja que planteja la possibilitat que existeixi una massa que aparegui al sobtadament al sistema –per exemple a causa de la vaporació de líquids-. Així defineix l'equació de conservació de la massa com a:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w) = S_m$$

Eq 2.3.12

2. Quantitat de moviment:

$$\sum F = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{VC} V \rho dV \right) + \sum_i (\dot{m}V_i)_{sort} - \sum_i (\dot{m}V_i)_{entr} \quad \text{Eq 2.3.13}$$

O el què és el mateix:

$$\sum F = dxdydz \left[\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} (\rho V) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u V) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho u V) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w V) \right]$$

Aplicant la formula de l'acceleració (Eq 2.3.8), queda:

$$\sum F = \rho \frac{dV}{dt} dxdydz \quad \text{Eq 2.3.14}$$

Ara cal definir aquestes forces. Existeixen dos tipus de forces: les volumètriques i les superficials.

- Les volumètriques es deuen a camps externs, en el nostre cas la gravetat.
Llavors,
 $dF_{grav} = \rho g dxdydz$
- Les superficials són degudes a la pressió hidrostàtica i als esforços viscosos. El tensor és de la següent manera:

$$\sigma = \begin{bmatrix} -p + \tau_{xx} & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & -p + \tau_{yy} & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & -p + \tau_{zz} \end{bmatrix}$$

De forma explícita, la formula de la conservació de la quantitat de moviment queda:

$$\rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$\rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$\rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

Eq 2.3.15

Si suposem que el fluid és newtonià, el seu tensor és:

$$\begin{bmatrix} 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} & \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} & \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) & \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) & 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix}$$

Arribem a les expressions de Navier Stokes:

$$\rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{d^2 u}{dx^2} + \frac{d^2 u}{dy^2} + \frac{d^2 u}{dz^2} \right) = \rho \frac{du}{dt}$$

$$\rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{d^2 u}{dx^2} + \frac{d^2 u}{dy^2} + \frac{d^2 u}{dz^2} \right) = \rho \frac{dv}{dt}$$

$$\rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{d^2 u}{dx^2} + \frac{d^2 u}{dy^2} + \frac{d^2 u}{dz^2} \right) = \rho \frac{dw}{dt}$$

Eq 2.3.16

En el nostre cas d'estudi, resolrem un problema en què el fluid és newtonià, llavors ANSYS Fluent [18] incorporarà en la seva bateria d'equacions diferencials l'Eq 2.3.16.

3. Equació de moment cinètic:

En aquest cas, només donarem el resultat final de l'equació diferencial per un flux general, tal i com ho planteja ANSYS Fluent [18]. Si el centre de masses del volum

infinitesimal gira al voltant de l'eix O , paral·lel a z , un angle θ l'equació queda:

$$\left[\tau_{xy} - \tau_{yx} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} (\tau_{xy}) dx - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y} (\tau_{yx}) dy \right] dx dy dz = \frac{1}{12} \rho (dx dy dz) (dx^2 + dy^2) \frac{d^2 \theta}{dt^2}$$

Eq 2.3.17

Aquesta equació de conservació no serà necessària en el nostre problema, ja que no es produeixen rotacions al fluid.

4. Equació de l'energia:

De la mateixa manera que abans, només donarem el resultat de l'expressió final, que és la que utilitza ANSYS Fluent.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + \rho)) = \nabla \cdot \left(\lambda \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\tau + \vec{v}) \right) + S_h \quad \text{Eq 2.3.18}$$

On J és el flux de difusió, h és l'entalpia i S el flux volumètric de calor produït per reaccions químiques.

2.4. Normativa

2.4.1. Codi tècnic d'edificació (CTE)

El Codi Tècnic de l'Edificació (CTE) [19], és el marc normatiu que estableix les exigències que han de complir els edificis en funció de la seguretat i habitabilitat que estableix la Llei 38/1999 de 5 de novembre de l'Ordenació de l'edificació (LOE) . Els documents bàsics de caràcter tècnic estan dividits en: Seguretat estructural, Seguretat en cas d'incendi, Seguretat d'utilització i accessibilitat, Protecció davant els renous, Estalvi d'Energia i Salubritat. En el nostre cas d'estudi, ens interessa els criteris tècnics dels documents d'Estalvi d'Energia i de la Salubritat.

2.4.1.1. Estalvi Energia

[20]

El document bàsic (DB) de l'Estalvi d'Energia té com a objectiu establir unes regles i procediments que permetin complir els requisits bàsics d'estalvi energètic. Per tant, aconseguir l'ús racional de l'energia pel seu consum, en altres paraules millorar l'eficiència energètica de l'edifici. El document es divideix en 5 exigències: limitació del consum energètic, establir condicions pel control de la demanda energètica, condicions de les instal·lacions tèrmiques, condicions de les instal·lacions d'il·luminació i contribució mínima d'energia renovable. A nosaltres ens interessa el segon punt: les condicions pel control de la demanda energètica (HE1).

2.4.1.1.1. Control de la demanda energètica

Condicions de l'envolupant tèrmic.

Per a controlar la demanada energètica, tots els edificis han de disposar d'un envolupant tèrmic amb les característiques adients per tenir un benestar tèrmic, depenent de la seva zona climàtica d'hivern. Aquesta zona climàtica s'identifica amb una lletra -en el cas de l'hivern- i amb un nombre -en el cas de l'estiu- i està establerta per cada localitat.

L'envolupant tèrmic està compost per tots els tancaments –elements que separen l'exterior amb l'interior de l'edifici-, particions interiors i ponts tèrmics, que delimiten tots els espais habitables.

El pont tèrmic és la zona de l'edifici en què s'evidencia una variació en la uniformitat de la construcció que provoca una baixada de la resistència tèrmica. Aquests es produeixen per el canvi d'amplada dels tancaments, per la diferència de conductivitat dels elements o per la diferència entre àrea interna i externa dels elements, entre altres coses. Els ponts tèrmics més comuns són:

- Els integrats als tancaments: pilars, forats, etc.
- Els formats als tancaments: unions de les façanes amb murs, soleres, cobertes, etc.
- Els formats a les cantonades.
- Els formats per voladissos.
- Els formats entre els envasos interiors i tancaments exteriors.

Així doncs, estan establerts uns valors màxims d'alguns paràmetres per cada zona climàtica d'hivern en cada element de l'envolupant tèrmic. Per exemple, per la transmitància tèrmica

$(U = \frac{1}{R_T})$ hi tenim la següent taula:

Tabla 3.1.1.a - HE1 Valores límite de transmitancia térmica, U_{lim} [W/m²K]

Elemento	Zona climática de invierno					
	α	A	B	C	D	E
Muros y suelos en contacto con el aire exterior (U_s, U_M)	0,80	0,70	0,56	0,49	0,41	0,37
Cubiertas en contacto con el aire exterior (U_c)	0,55	0,50	0,44	0,40	0,35	0,33
Muros, suelos y cubiertas en contacto con espacios no habitables o con el terreno (U_T) Medianerías o particiones interiores pertenecientes a la envolvente térmica (U_{MD})	0,90	0,80	0,75	0,70	0,65	0,59
Huecos (conjunto de marco, vidrio y, en su caso, cajón de persiana) (U_H)*	3,2	2,7	2,3	2,1	1,8	1,80
Puertas con superficie semitransparente igual o inferior al 50%			5,7			

*Los huecos con uso de escaparate en unidades de uso con actividad comercial pueden incrementar el valor de U_H en un 50%.

Figura 10: Valors límit de transmitància tèrmica [20].

Existeixen més taules per diferents criteris o paràmetres, com el coeficient global de

transmissió de calor ($K = \frac{\sum_i h_i}{A_{int}}$)

Eq 2.4.1, on h_i és el coeficient de transferència de calor per cada element i A_{int} és l'àrea de l'envolupant tèrmic.

Limitació de descompensacions:

La transmitància U entre particions interiors, té uns màxims en funció de l'ús que se li dóna:

Tabla 3.2 - HE1 Transmitancia térmica límite de particiones interiores, U_{lim} [W/m²K]

	Tipo de elemento	Zona climática de invierno					
		α	A	B	C	D	E
Entre unidades del mismo uso	Particiones horizontales	1,90	1,80	1,55	1,35	1,20	1,00
	Particiones verticales	1,40	1,40	1,20	1,20	1,20	1,00
Entre unidades de distinto uso Entre unidades de uso y zonas comunes	Particiones horizontales y verticales	1,35	1,25	1,10	0,95	0,85	0,70

Figura 11: Transmitància tèrmica límit de particions interiors [20].

Limitació de condensacions en l'envolupant tèrmic:

Si s'arribessin a produir condensacions a l'envolupant tèrmic de l'edifici, aquestes no haurien de suposar cap problema en les prestacions tèrmiques o defectes. Així que, en aquest cas el criteri no està quantificat sinó que és més aviat qualitatiu.

2.4.1.1.2. Càlcul de la transmitància en un envolupant tèrmic

[21]

S'analitzarà la transmitància tèrmica en 4 casos: en tancaments en contacte amb l'aire exterior, en tancaments en contacte amb el terreny, en particions interiors amb espais no habitables i en forats:

En tancaments de contacte amb l'aire exterior:

Es refereix a murs de façana, cobertes i sols en contacte amb l'exterior. Sabem que

$R_{term} = \frac{e}{\lambda}$ (Eq 2.2.4) en el cas d'una paret plana. Per tant, per trobar la transmitància tèrmica

total U_T d'una paret constituïda per plaques és pot calcular la resistència total com a suma de

les altres i fer la inversa $U_T = \frac{1}{\sum_i R_i}$ Eq 2.4.2

Les càmeres d'aire també poden ser caracteritzades per una resistència que dependrà de si està molt ventilada, lleugerament ventilada o sense ventilar; aquesta descripció es farà a partir d'uns criteris de flux establerts. Evidentment, tant com més ventilat estigui l'aire, menys resistència tèrmica tindrà: si està lleugerament ventilat, aquests valors es redueixen a la meitat respecte a la no ventilació.

En tancaments en contacte amb el terreny:

Aquests tancaments poden ser al terra mitjançant una solera, als murs o les cobertes -si estan enterrades- .

- Per calcular la transmitància d'una solera es fa a partir d'una taula que depèn de l'amplària de la banda (D), la resistència tèrmica de l'aïllant (R_{term}) i la longitud característica de la solera(B').
- Per calcular la transmitància dels murs també es fa a partir d'una taula en funció de la profunditat (z) i de la resistència tèrmica de l'aïllant (R_{term}).
- Per calcular la de les cobertes, en cas que estiguin enterrades, es fa utilitzant la fórmula $R_{term} = \frac{e}{\lambda}$. Eq 2.4.3

En particions interiors:

La transmitància tèrmica ve donada per la següent expressió: $U = U_p \cdot b$ Eq 2.4.4

- On U_p és la transmitància de la partició interior en contacte amb l'espai no habitable calculada amb la fórmula de la paret plana.
- On b és el coeficient de reducció de la temperatura obtingut mitjançant una tabla –la majoria dels casos–.

En forats

Es troba amb l'equació:

$$U_H = \frac{A_{H,v}U_{H,v} + A_{H,m}U_{H,m} + A_{H,p}U_{H,p} + l_v\psi_v + l_p\psi_p}{A_{H,v} + A_{H,m} + A_{H,p}} \quad \text{Eq 2.4.5}$$

Sent:

- U_H la transmitància tèrmica.
- $U_{H,v}$ i $A_{H,v}$ la transmitància tèrmica i l'àrea d'envidrament, respectivament.
- $U_{H,m}$ i $A_{H,m}$ la transmitància tèrmica i l'àrea del marc, respectivament.
- $U_{H,p}$ i $A_{H,p}$ la transmitància tèrmica i l'àrea de la zona amb panell opac, respectivament.
- ψ_v i l_v la transmitància tèrmica lineal deguda a l'acoblament i a la longitud entre marc i envidrament, respectivament.
- ψ_p i l_p la transmitància tèrmica lineal deguda a l'acoblament i a la longitud entre marc i panells opacs, respectivament.

2.4.1.2. Salubritat

[22]

El document bàsic (DB) de Salubritat té com a objectiu establir unes regles i procediments que permetin complir les exigències de salubritat. Això és protegir la Higiene, la Salut i la Protecció del Medi Ambient. El document es divideix en 6 exigències: Protecció davant les humitats, recollida i evacuació de residus, qualitat de l'aire interior, subministrament d'aigua, evacuació d'aigües i protecció davant el radó. A nosaltres ens interessa el tercer punt: La qualitat de l'aire interior (HS3).

2.4.1.2.1. Qualitat de l'aire

Les condicions perquè un local es consideri habitable en termes de qualitat d'aire són:

- S'ha d'aportar un cabal exterior suficient per aconseguir que la mitjana anual de CO2 sigui menor 900ppm i que si en algun moment supera les 1600ppm, el cabal sigui menor 500000ppm/h.
- Quan el local no està ocupat, el cabal d'aire exterior mínim ha de ser de 1,5l/s, el què és considerat suficient per eliminar els contaminants no directament relacionats amb la presència humana.

Aquestes dues exigències es consideren satisfetes si es compleix la següent taula:

Tabla 2.1 Caudales mínimos para ventilación de caudal constante en locales habitables

Tipo de vivienda	Caudal mínimo q_v en l/s				
	Locales secos ⁽¹⁾ ⁽²⁾			Locales húmedos ⁽²⁾	
	Dormitorio principal	Resto de dormitorios	Salas de estar y comedores ⁽³⁾	Mínimo en total	Mínimo por local
0 ó 1 dormitorios	8	-	6	12	6
2 dormitorios	8	4	8	24	7
3 o más dormitorios	8	4	10	33	8

(1) En los *locales* secos de las viviendas destinados a varios usos se considera el caudal correspondiente al uso para el que resulte un caudal mayor

(2) Cuando en un mismo *local* se den usos de *local* seco y húmedo, cada zona debe dotarse de su caudal correspondiente

(3) Otros *locales* pertenecientes a la vivienda con usos similares (salas de juego, despachos, etc.)

Figura 12: Cabals mínims per ventilació en locals habitables [20].

En cas de cuines –o altres zones de cocció- , a part d'aquesta ventilació general, s'ha de disposar d'un sistema d'extracció de cabal mínim de 50l/s.

Les condicions de locals no habitables són menys restrictives:

Tabla 2.2 Caudales de ventilación mínimos en locales no habitables

Locales	Caudal mínimo q_v en l/s	
	Por m ² útil	En función de otros parámetros
Trasteros y sus zonas comunes	0,7	
Aparcamientos y garajes		120 por plaza
Almacenes de residuos	10	

Figura 13: Cabals de ventilació mínims a locals no habitables [22].

En els habitatges, concretament, s'ha de disposar d'un sistema general de ventilació que pot ser híbrida o mecànica. L'aire ha de circular de les zones seques a les humides: així que, els menjadors, dormitoris i sales d'estar han de tenir obertures d'admissió i banys i cuines obertures d'extracció –connectades a conductes d'extracció-. A més, les particions han d'estar dotades d'obertures de pas. Uns exemples de ventilació a l'interior d'una casa:

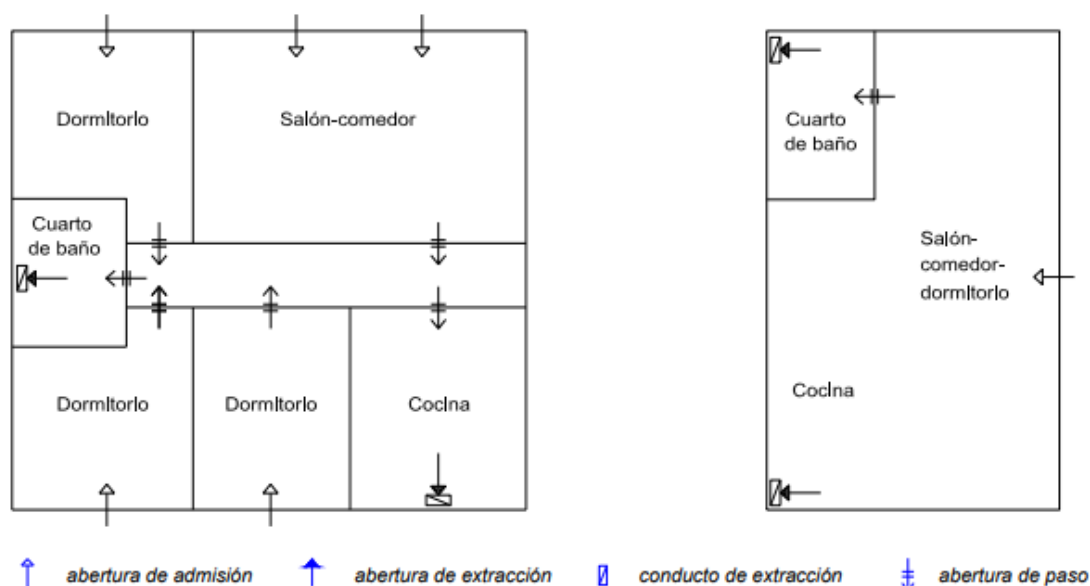


Figura 3.1 Ejemplos de ventilación en el interior de las viviendas

Figura 14: Exemples de ventilació interior [22].

2.4.1.2.2. Dimensions:

Totes les obertures de ventilació –admissió i extracció- han de tenir una àrea efectiva mínima depenent del cabal. Aquesta àrea és $A=4q$ menys en obertures de pas que ha de ser $A=8q$. Els conductes d'extracció poden ser ventilació híbrida o mecànica.

La ventilació híbrida disposa d'un aspirador híbrid que extreu el cabal mitjançant uns conductes. Aquests han de tenir una secció mínima que es troba mitjançant taules que depenen del cabal i del tir –que depèn del nombre de plantes de l'edifici i de la zona tèrmica-. En canvi, l'extracció mecànica, que disposa d'un aspirador mecànic, ha de tenir un conducte d'extracció de secció mínima $S=2,5q$.

Finalment, la darrera restricció dimensional que existeix és que la superfície de les portes i finestres del local habitable ha de ser com a mínim una vintena part de tota la superfície útil.

2.4.2. Lleis Europees

[23]

La directiva 2010/31/UE del Parlament Europeu i el Consell, van establir uns requisits sobre l'eficiència energètica dels edificis, on segons ells un 40% de l'energia total és consumida. D'aquesta manera establia una metodologia de càlcul comuna per tots els Estats Membres, uns mínims que havien de complir els edificis i un Certificat Energètic, entre altres coses.

Els objectius quantitatius d'aquest document són reduir les emissions de l'efecte hivernacle un 40% respecte al 1990, arribar a una contribució del 30% de fonts renovables en el consum de l'energia final, i –a partir de l'eficiència energètica- estalviar un 27% de consum energètic el 2020.

L'Estat espanyol a partir del Reial Decret 235/2013 del 5 d'abril, aprova les exigències europees, de manera que, a partir d'aquest moment és d'obligat compliment el Certificat Energètic. Així que, quan es construeix, ven o lloguen els edificis, aquest certificat ha de ser ensenyat al comprador o llogater [24].

2.4.2.1. El Certificat Energètic

Amb aquest Reial Decret, mitjançant una etiqueta d'eficiència energètica, se li assigna a un habitatge una qualificació que variarà des de la A –habitatges molt eficients- a la G –habitatges molt poc eficients-. Per a determinar la qualificació, es té en compte en primer lloc el CTE, és a dir que es compleixi la normativa edificativa. A més, a partir de la zona climàtica de l'edifici, el consum energètic que es té. Finalment, les característiques de l'habitatge:

façana, coberta, finestres, sistemes de climatització, instal·lacions en font renovable, etc.

Segons els estudis fets per l'Institut Català de l'Energia [25], a partir de la qualificació es poden extrapolar les despeses energètiques i consum d'energia primària (veure Figura 15):

QUALIFICACIÓ ENERGIA PRIMÀRIA (EP)	CONSUM MITJÀ EP CEE [kWh/m2-any]	CONSUM MITJÀ EP TOTAL [kWh/m2-any]	ESTALVI RESPECTE ANTERIOR %	ESTALVI % RESPECTE "G"
A	33,80	56	26%	89%
B	45,94	77	36%	85%
C	71,57	119	21%	77%
D	91,10	152	39%	71%
E	149,14	249	31%	52%
F	215,83	360	30%	30%
G	309,56	516	0%	0%

Figura 15: Despeses energètiques en funció del certificat [25].

A part d'aquesta qualificació, el certificat dona una mica més d'informació (veure Figura 16):

The diagram shows an Energy Performance Certificate (EPC) with several callouts explaining its parts:

- Qualificació energètica:** Cada lletra implica un 30% d'estalvi respecte l'anterior.
- Número de registre:** corresponent atorgat per l'ICAEN.
- Accés a l'apartat de certificació de l'icaen:** (pointing to the QR code)
- Dades de l'immoble que s'ha certificat:** (pointing to the building details section)
- Dades de consum d'energia primària no renovable:** resultant en kWh/any per m².
- Dades de l'emissió de CO₂:** resultant en CO₂/m³ per any.
- Data fins a la qual és vàlid el certificat i a partir de la qual s'haurà de renovar:** (pointing to the validity date field)

The EPC itself displays the following information:

- QUALIFICACIÓ ENERGÈTICA DE L'EDIFICI ACABAT ETIQUETA:** A (més eficient)
- ESCALA DE LA QUALIFICACIÓ ENERGÈTICA:** A (més eficient) to G (menys eficient)
- Consum d'energia:** 37 kWh/m² any
- Emissió:** 8 kgCO₂/m² any
- REGISTRE:** (field for registration number)
- Vàlid fins:** (field for validity date)
- Logos:** Generalitat de Catalunya, Institut Català d'Energia, ESPAÑA, Directiva 2010/31/UE

Figura 16: Exemple del certificat [25].

2.4.2.2. Certificat Energètic a Catalunya

[25]

La normativa sobre Eficiència Energètica ha anat evolucionant al llarg dels anys. Així, per exemple, abans del 1981 no hi havia cap normativa específica sobre l'envolupant tèrmica de l'edifici. Entre el 1981 i el 2006, s'estableix la normativa NBE-CT-79, que exigeix unes transmissàncies màximes als diferents tancaments. Entre el 1989 i el 2007, només a Catalunya, s'aplica NRE-AT-89, que millora alguns aspectes respecte a la normativa anterior. Entre el 2006 i 2014 se substitueix tota la normativa pel CTE, explicat anteriorment; i a partir del març del 2014 s'ha de complementar amb el Reial Decret 235/2013, que obliga que els habitatges tinguin un Certificat Energètic.

Llavors, és d'esperar que les construccions s'anaven adaptant a les normatives d'aquell moment. Per tant, si analitzem les qualificacions –aplicant la normativa vigent- que tenen en funció de l'any de construcció, observem que pugen el nombre d'edificis de qualificació A, B i C –bona eficiència- i baixen el de tipus E, F i G –mala eficiència-. Veure Figura 17.

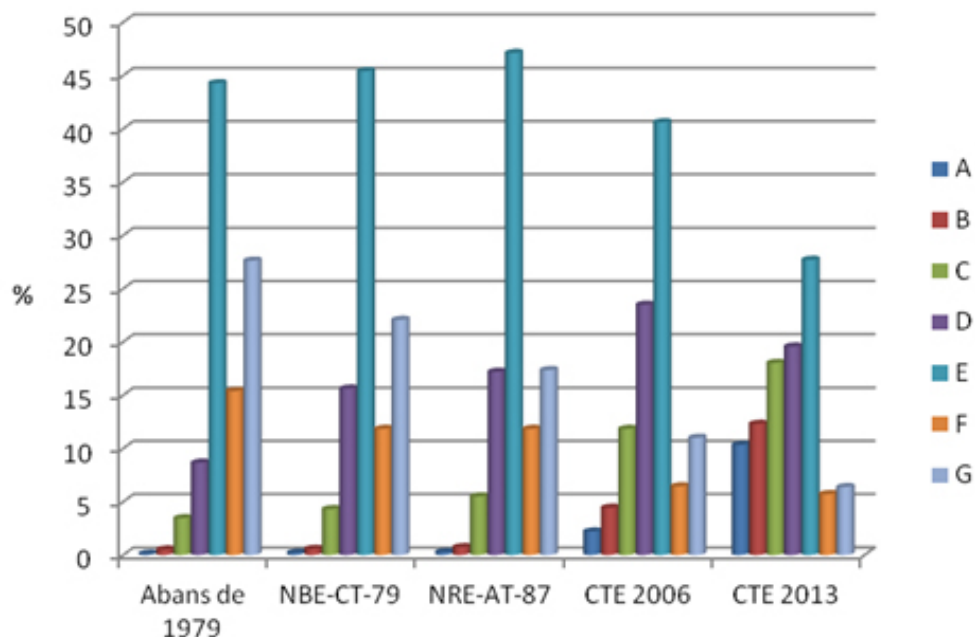


Figura 17: Qualificació energètica de diferents edificis de Catalunya [25].

3. METODOLOGIA

3.1. Presentació del cas d'estudi

3.1.1. L'edifici

Com ja hem mencionat, l'edifici –Sant Ramon, 2- es va construir fa més de 100 anys, exactament el 1900. Té 4 plantes amb 3 pisos per planta i un pati interior.

A la Figura 18 podem veure l'edifici, en color rosa, damunt el mapa urbanístic [26]:

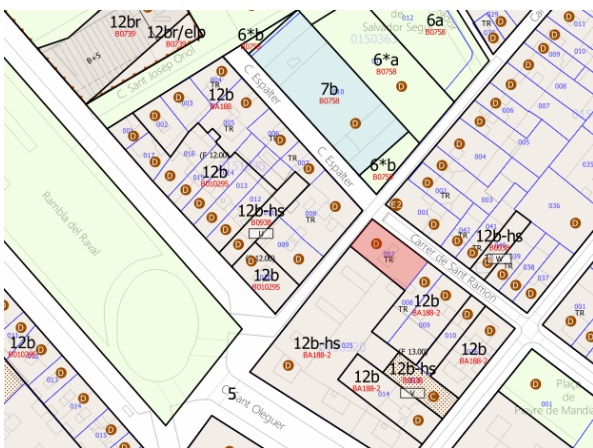


Figura 18: En color rosa es veu l'edifici estudiat [25].

Per una major contextualització, també s'ha proporcionat una imatge via satèl·lit (Figura 19):

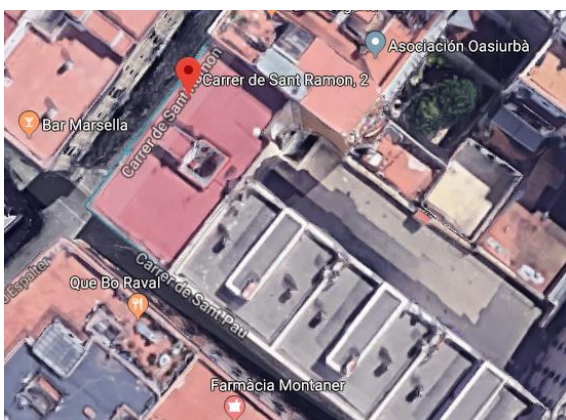


Figura 19: Imatge via satèl·lit de l'edifici, fotografia extreta de GoogleMaps.

La construcció està entre el carrer de Sant Ramon i el carrer de Sant Pau. D'aquesta manera, hi tenim dues façanes que donen en aquests carrers. Aquestes façanes tenen un gruix de 35cm i estan fetes mitjançant paredat de morter i cal, de la mateixa manera que la resta de parets. Per altra banda, l'edifici comunica amb dos altres blocs de pisos – mitgera1 i mitgera2, de 15cm cadascuna-. També té un pati interior de reduïdes dimensions i un altre pati que comunica amb els altres edificis de l'illa –en aquest, al ser tan gran, el considerarem exterior-. Finalment, hi tenim la coberta: plana amb un petit pendent i feta de rajola de ceràmica.

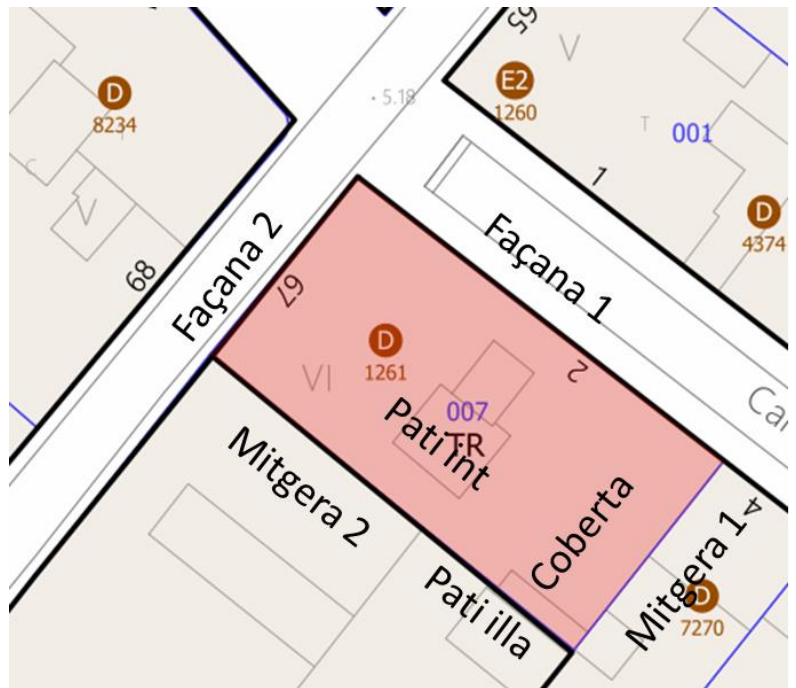


Figura 20: Edifici Sant Ramon, 2.

3.1.2. 4t 1a

El pis d'estudi és el 4t 1a, situat davall coberta. En la Figura 21 es pot veure la seva orientació real dins del solar:

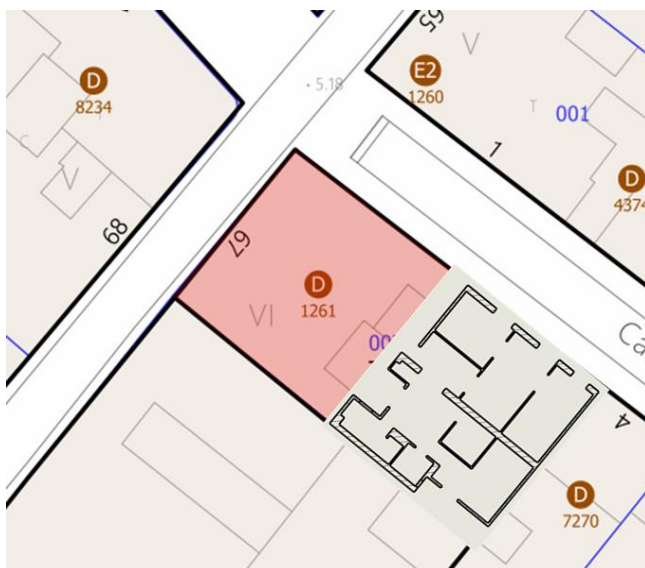


Figura 21: Superposició del 4, 1ª sobre l'edifici.

Com podem observar, proporcionalment és el més gran del 4t pis. Tot i que els arquitectes no disposaven dels m² exactes, mitjançant una aproximació es va poder calcular que la llar té uns 87,5m². A partir del programa CAD, SolidWorks –del qual més endavant s'explicarà el seu ús real en l'estudi-, es va fer una petita extrusió de totes les habitacions per trobar la seva àrea (veure Figura 22). El programa ens informa de l'àrea total de tots els cossos. Cert és que cada cos –

habitació- té 6 àrees, però al fer una extrusió tan petita (0,5mm), es menysprearan les laterals. Així, podem afirmar que l'àrea calculada és la superior i inferior. Llavors, si dividim entre dos, trobarem l'àrea útil del pis:

$$A_{\text{útil}} = \frac{175m^2}{2} = 87,5m^2$$

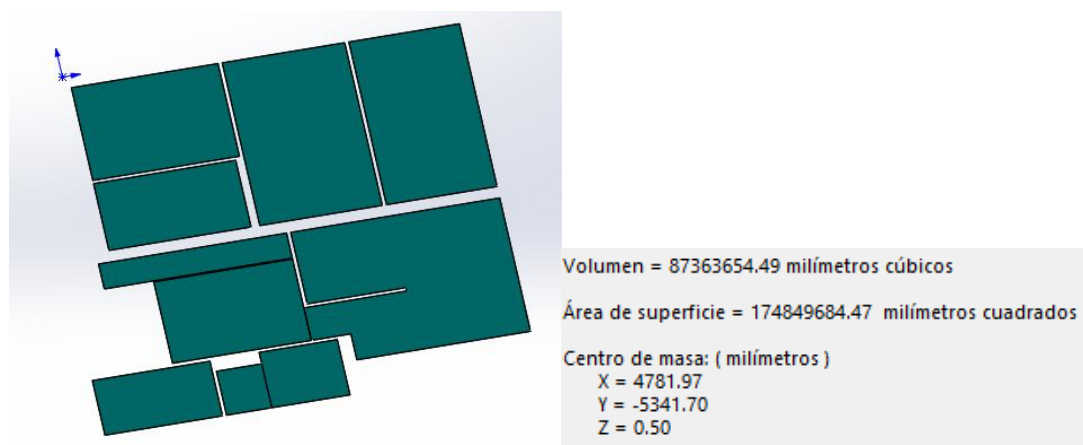


Figura 22: Càlcul de la superfície del pis.

A la Figura 23 es veu el plànol en planta de la casa. Aquest habitatge el podem dividir en dues parts: la superior i la inferior, ja que està separada per una paret força gruixuda -de 35cm- que serveix de mur de carga. En total hi ha 11 compartiments. A la part superior hi ha l'entrada, una sala d'estar i dos dormitoris. La sala d'estar i els dormitoris tenen uns finestrals de 2,10m d'alçada que donen directament al carrer Sant Ramon. A la part inferior, hi trobem més compartiments: un menjador, un traster, un dormitori, dos banys, una cuina i un rebost. El dormitori té un finestral, de les mateixes dimensions que els anteriors, que dona al pati de l'illa. El bany inferior també dona a aquest pati, en canvi el superior dona al pati interior. A més d'aquesta finestra, el pati interior en té dues més: del menjador i de la cuina.

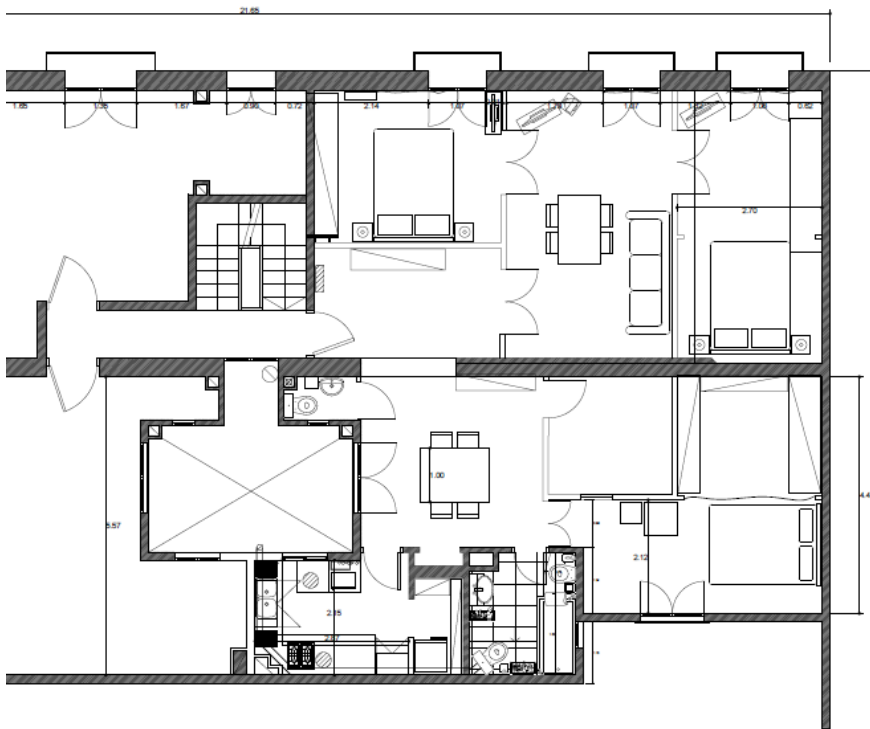


Figura 23: Plànol en planta del pis.

De forma més esquemàtica, hem anomenat els compartiments, de la següent manera.

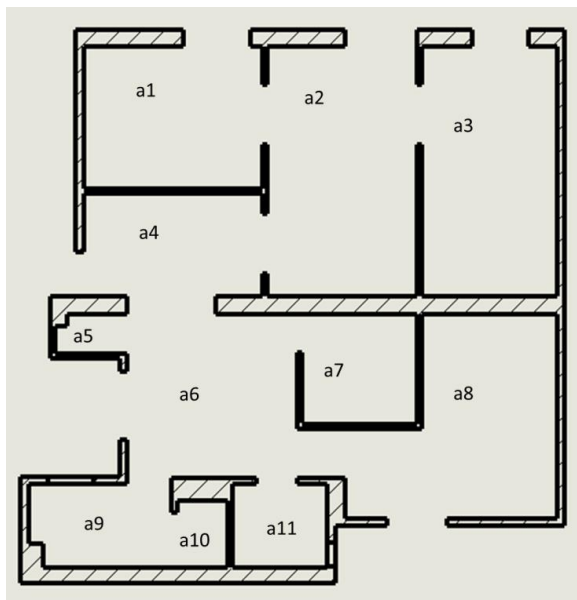


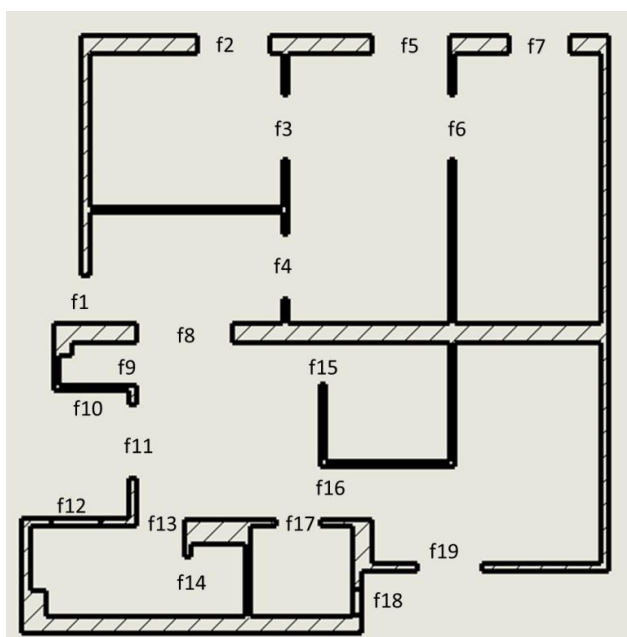
Figura 24: Plànol amb l'enumeració dels compartiments.

En la següent taula, s'especifica què és cada habitació:

A1	Dormitori 1
A2	Sala d'estar
A3	Dormitori 2
A4	Entrada
A5	Bany 1
A6	Menjador
A7	Traster
A8	Dormitori 3
A9	Cuina
A10	Rebot
A11	Bany 2

I les finestres i portes:

(F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F8, F9, F11, F13, F14, F15, F16, F17, F19) tenen una amplada especificada al croquis i una alçada que va des del terra al 2,10m. Les altres finestres:



	Alçada punt inferior	Dimensions (horitzontal x vertical)
F10	1,20m	0,5x0,5m
F12	1,20m	0,9x1m
F18	1,20m	0,5x0,5

Figura 25: Enumeració de les finestres i portes

A la Figura 26 es poden veure algunes habitacions i finestres a partir de fotografies fetes al pis:



Figura 26: Fotografies de l'interior del pis

El sostre, en general, està a una alçada de 2,6m i no és pla, sinó que té un revoltó (Figura 27), on les bigues estan orientades de la següent manera (veure Figura 28):

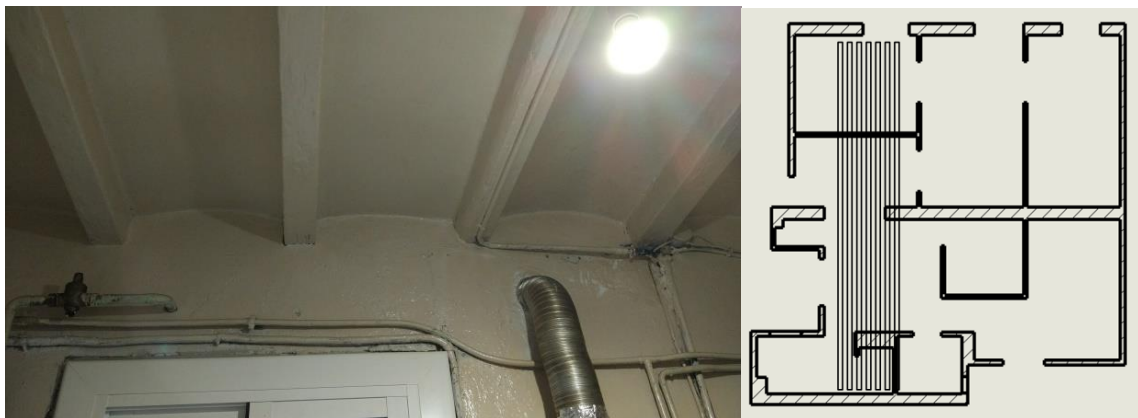


Figura 27: Sostre del pis.

Figura 28: Orientació de les bigues.

Els arquitectes ens van proporcionar el dibuix del sostre d'on vam poder determinar el gruix i l'alçada -0,25m i 2,6m, respectivament-.

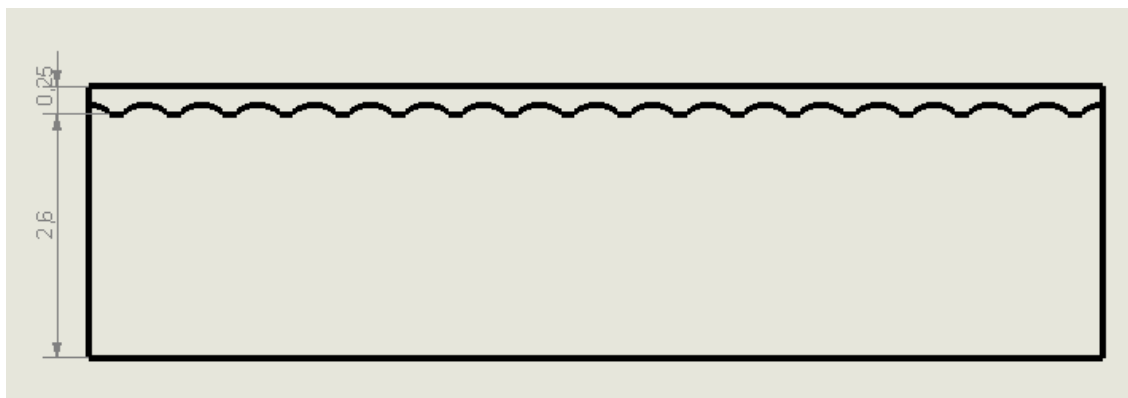


Figura 29: Dibuix de les bigues amb cotes funcionals.

Per simplificar el nostre cas d'estudi, considerarem el sostre pla, a una distància de 2,6m i un gruix de 0,25m.

El bany a5, però, té un fals sostre a 2,10m d'alçada de manera que no hi trobem aquests revoltos.

Finament, és totalment necessari evidenciar el mal estat d'alguns elements del pis per donar-li a l'estudi una dimensió més social. Amb les següents fotografies es fa palès la urgència de fer les intervencions, i en conclusió li afegeix un plus d'importància a l'estudi.



Figura 30: Alguns desperfectes del pis

Per altra banda, des d'un punt de vista estrictament analític, aquest mal estat d'alguns elements, fa que el nostre model sigui una aproximació, ja que no podem modelar-ho de cap manera. Així i tot, en el moment de la intervenció, aquests desperfectes serien abordats de facto, de manera que el *bessó virtual* simularia perfectament el comportament energètic del pis quan se li hagin aplicat les solucions. Per tant, aquestes irregularitats no afecten el nostre objectiu: validar i comparar futures intervencions al pis mitjançant un *bessó virtual*.

3.2. Confecció de la geometria

L'elaboració de la geometria s'ha fet utilitzant dos programes: SOLIDWORKS i una aplicació d'ANSYS, DesignModeler.

3.2.1. SOLIDWORKS

Amb el SOLIDWORKS només s'han fet les parets del pis. Això és a causa que si la geometria feta en SOLIDWORKS –en format IGES- conté relacions com: “Hasta la superficie”, “En plano” o “Perforar” (Figura 31), moltes vegades dona errors quan s'importa a ANSYS. Llavors, es dificulta molt incorporar l'aire o el sostre des dels SOLIDWORKS. Tot i així, s'ha seguit utilitzant el programa per fer les parets de pis, ja que el seu disseny forma part del gruix del problema i al ser exclusivament de disseny, facilita molt la confecció d'una geometria.

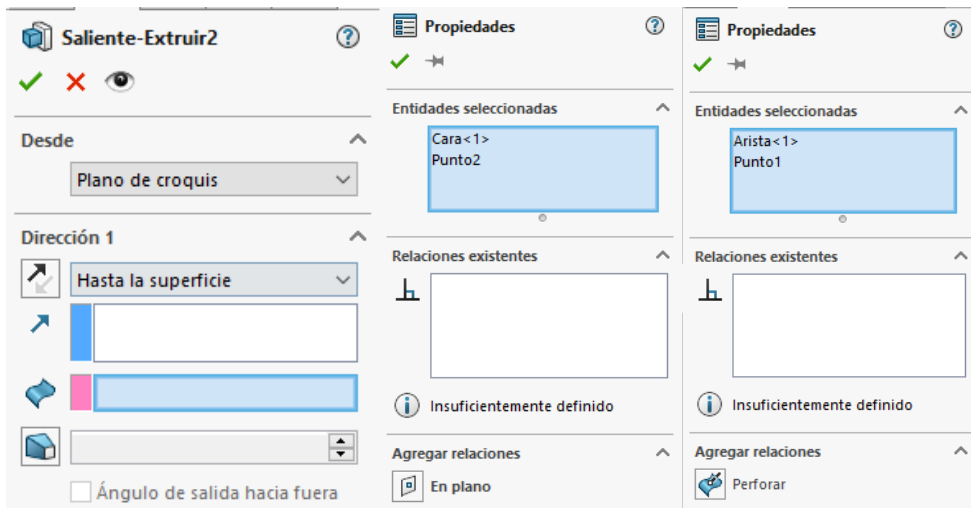
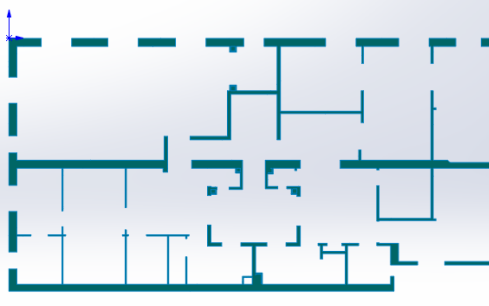


Figura 31: Algunes operacions de SolidWorks que donen errors a l'ANSYS.

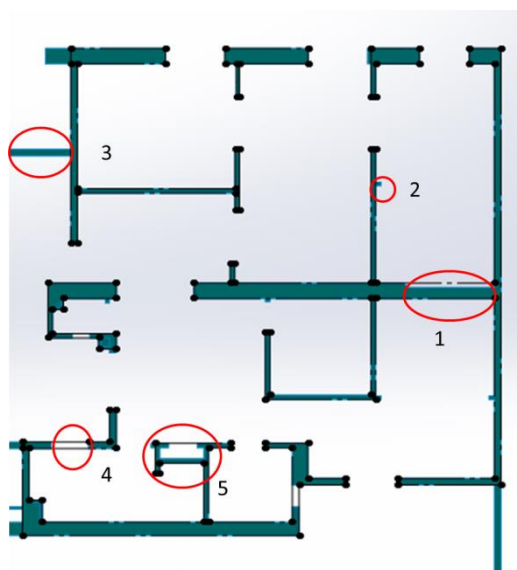
Els passos per fer la part de la geometria –parets-, són els següents:

Els voluntaris d'Oasiurbà tenien el plànol en planta en format AutoCAD de tot el 4 pis: amb els seus tres habitatges i el pati interior. Es va demanar que transformessin totes les parets en regions per així poder guardar-ho en format IGES. D'aquesta manera, es va poder importar la geometria al SOLIDWORKS.

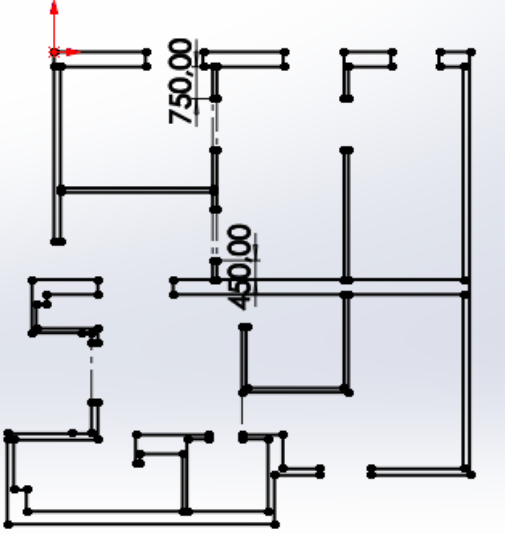
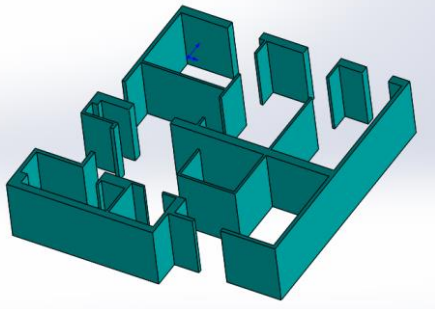
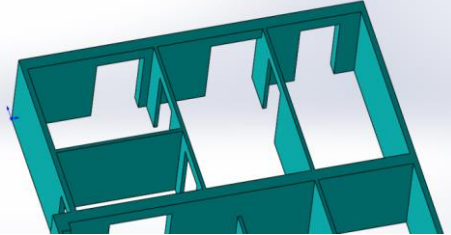
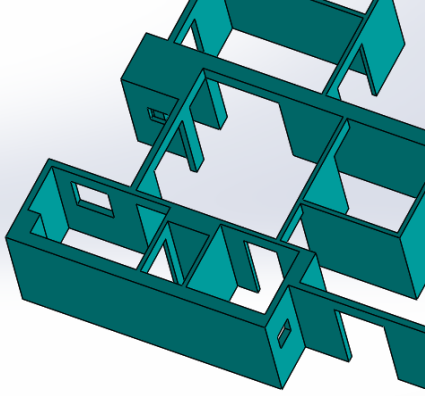


El següent pas va ser “copiar” les regions que corresponen al 4t 1a a un croquis. Aquí es varen fer algunes correccions i simplificacions de geometria. Aquestes són algunes:

1. Correcció de la paret.
2. Eliminació del marc.
3. Eliminació d'una paret fora del nostre cas d'estudi.
4. Eliminació d'algunes finestres –les més petites-.
5. Eliminació d'un petit compartiment que fa la funció d'armari.



Pot sorprendre l'eliminació d'algunes finestres, però cal dir que aquesta suspensió és temporal i al següents passos es recuperaran, ja s'explicarà el perquè.

<p>Comprovació d'algunes mides.</p>	 <p>A floor plan diagram of a room layout. A red arrow points upwards from the top-left corner. Two vertical dimensions are indicated: 750,00 and 450,00. The diagram shows several rectangular rooms and corridors with door and window symbols.</p>
<p>Extrusió del croquis a una distància de 2,6m</p>	 <p>A 3D perspective view of the floor plan from the previous row, showing the walls extruded upwards. The walls are colored in a teal shade.</p>
<p>Confecció de les portes i finestrals fent una extrusió en sentit contrari de 0,5m (2,6-2,1).</p>	 <p>A 3D perspective view of the teal walls from the previous row. Small rectangular protrusions, representing doors and windows, are extruded downwards from the walls.</p>
<p>Construcció de les finestres restants. Totes aquestes estaven a una distància aproximadament equidistant a les parets. Per això mateix no calia mantenir-les al pas 2 i complicar la metodologia de construcció. D'aquesta manera es fa un Tall –tres per ser curosos, ja que hi ha tres finestres- amb les mides especificades a l'Apartat 3.1.2.</p>	 <p>A 3D perspective view of the teal walls with the window frames (Tall-tres) constructed. The window frames are shown as teal structures protruding from the walls.</p>

3.2.2. DesignModeler

Un cop es tenia la geometria feta en SOLIDWORKS, es va guardar en format IGES i es va importar a l'aplicació d'ANSYS, DesignModeler (Figura 32).

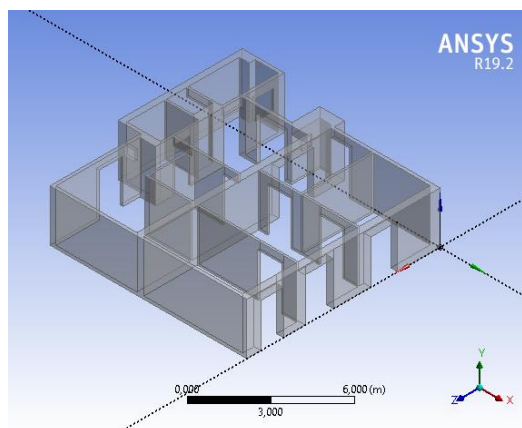


Figura 32: Geometria importada a ANSYS.

3.2.2.1. Modificació de les parets

El següent pas va ser l'edició d'aquesta geometria importada. Aquest pas és totalment necessari per definir les àrees de les parets, ja que en un futur seran determinants per les Connexions amb altres cossos. S'explicaran dos exemples amb les eines corresponents:

<p>Es pot veure que la paret en verd té 3 àrees.</p>	
<p>Es podria simplificar en una utilitzant l'eina Merge</p>	

Un altre cas, totalment contrari a l'anterior, és quan tenim una àrea gran i la volem dividir en dues, ja que cadascuna ha de correspondre a un compartiment (veure Figura 33) .

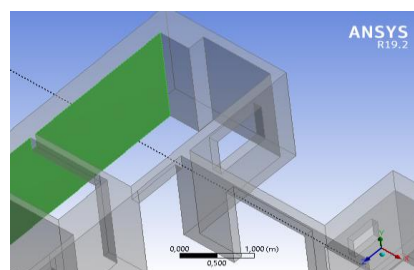
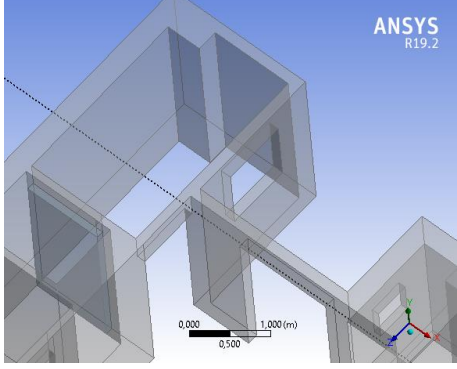
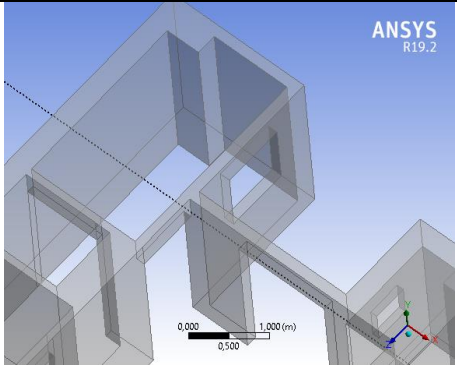
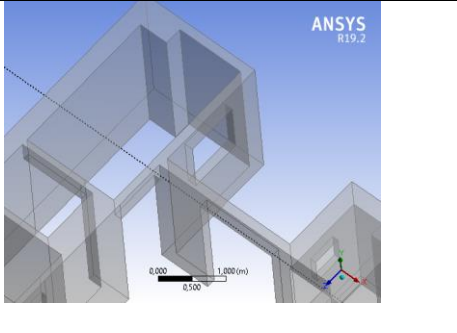


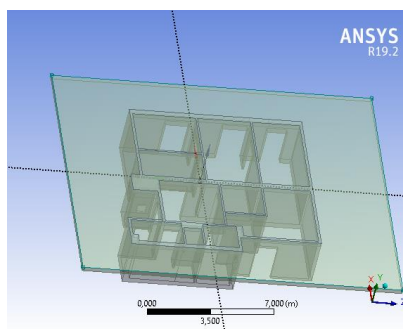
Figura 33: Dos compartiments amb una sola cara.

<p>Primer de tot, es farà una extrusió tapant la porta.</p>													
<p>Després una Booleana específica (<i>Imprint Faces</i>) de la següent manera. On el <i>Target Body</i> és el que correspon a l'àrea en verd i el <i>Tool Body</i> el que s'acaba d'extorsionar; com que hem especificat que no preservi el <i>Tool Body</i>, aquest últim s'eliminarà.</p>	<p>Details View</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Details of Boolean1</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Boolean</td> <td>Boolean1</td> </tr> <tr> <td>Operation</td> <td>Imprint Faces</td> </tr> <tr> <td>Target Bodies</td> <td>1 Body</td> </tr> <tr> <td>Tool Bodies</td> <td>1 Body</td> </tr> <tr> <td>Preserve Tool Bodies?</td> <td>No</td> </tr> </tbody> </table>	Details of Boolean1		Boolean	Boolean1	Operation	Imprint Faces	Target Bodies	1 Body	Tool Bodies	1 Body	Preserve Tool Bodies?	No
Details of Boolean1													
Boolean	Boolean1												
Operation	Imprint Faces												
Target Bodies	1 Body												
Tool Bodies	1 Body												
Preserve Tool Bodies?	No												
<p>Arribem al següent estadi.</p>													
<p>A continuació, s'emprarà altra vegada el <i>Merge</i> per fer-ne de dues àrees una. Les dues àrees contigües són totalment arbitràries, però quan s'incorpori l'aire s'ha de respectar fins on arriba cada compartiment.</p>													

3.2.2.2. Construcció del sostre

Per construir el sostre –recordem que amb la simplificació el considerarem pla- s’han fet els següents passos:

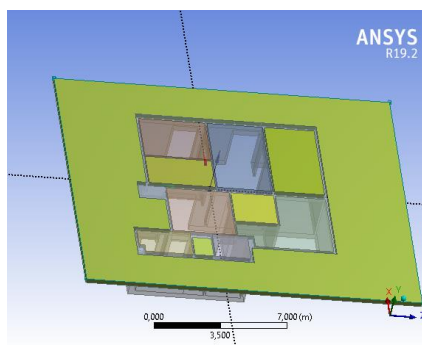
Primer, s’extorsionen totes les parets 0,25m. A més, a partir d’un pla situat a 2,6m, es fa un *Sketch* de grans dimensions i també s’extorsiona 0,25m. Llavors, en aquest moment tenim 3 Cossos: les parets, les parets extorsionades i un gran cub.

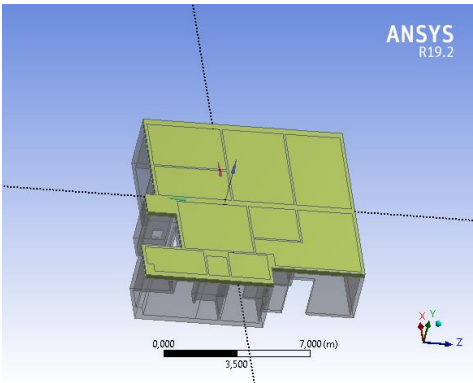
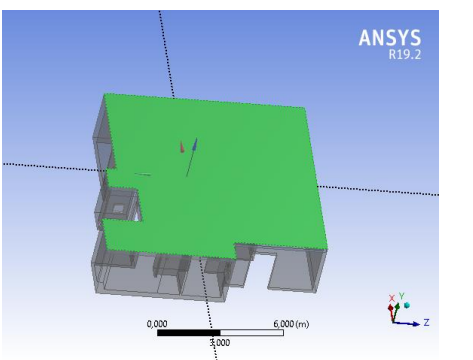


Després, es fa una Booleana de Resta, on el *Target Body* és el cub gran i el *Tool Body* les parets extorsionades.

Details View	
Details of Boolean4	
Boolean	Boolean4
Operation	Subtract
Target Bodies	1 Body
Tool Bodies	1 Body
Preserve Tool Bodies?	Yes

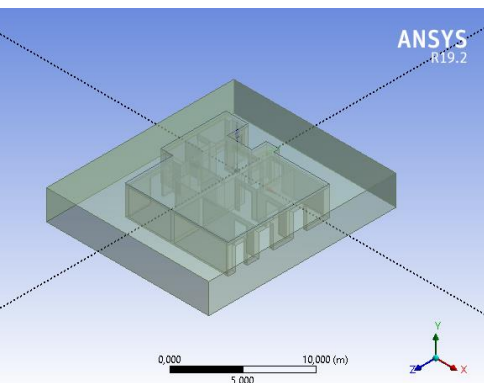
Així tindríem 13 Cossos: 11 sostres –un per cada compartiment-, les parets extorsionades i una part exterior.



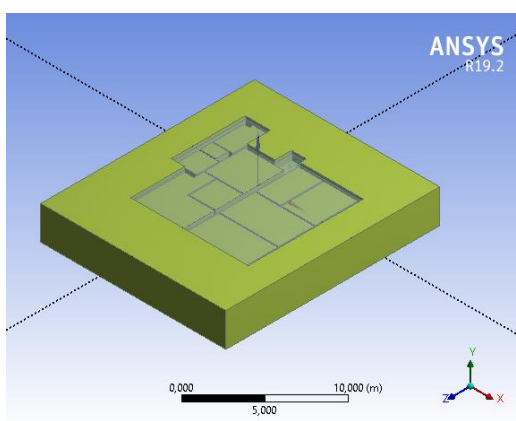
<p>Eliminem el cos exterior a la casa i unim els cossos interiors. Utilitzant una booleana d'unió .</p>	
<p>Finalment, utilitzem el <i>Merge</i> per unificar l'àrea superior</p>	

3.2.2.3. Implementació de l'aire

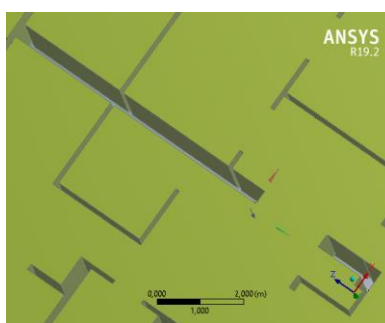
Per acabar de fer el model, cal incorporar l'aire: tant interior com l'exterior de l'edifici.

<p>Començarem creant un cub que cobreixi tot l'edifici.</p>	
---	--

De forma anàloga a la creació del sostre, es farà una Booleana de Resta, on el *Target Body* serà el cub creat i els *Target Bodies* les parets i el sostre.



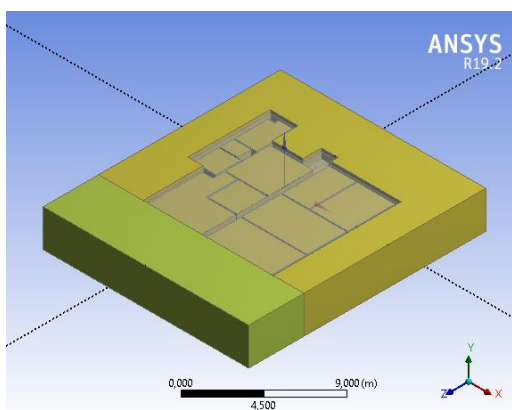
Mirant des de la part inferior, observem que el cub té uns forats on hi corresponen les parets.

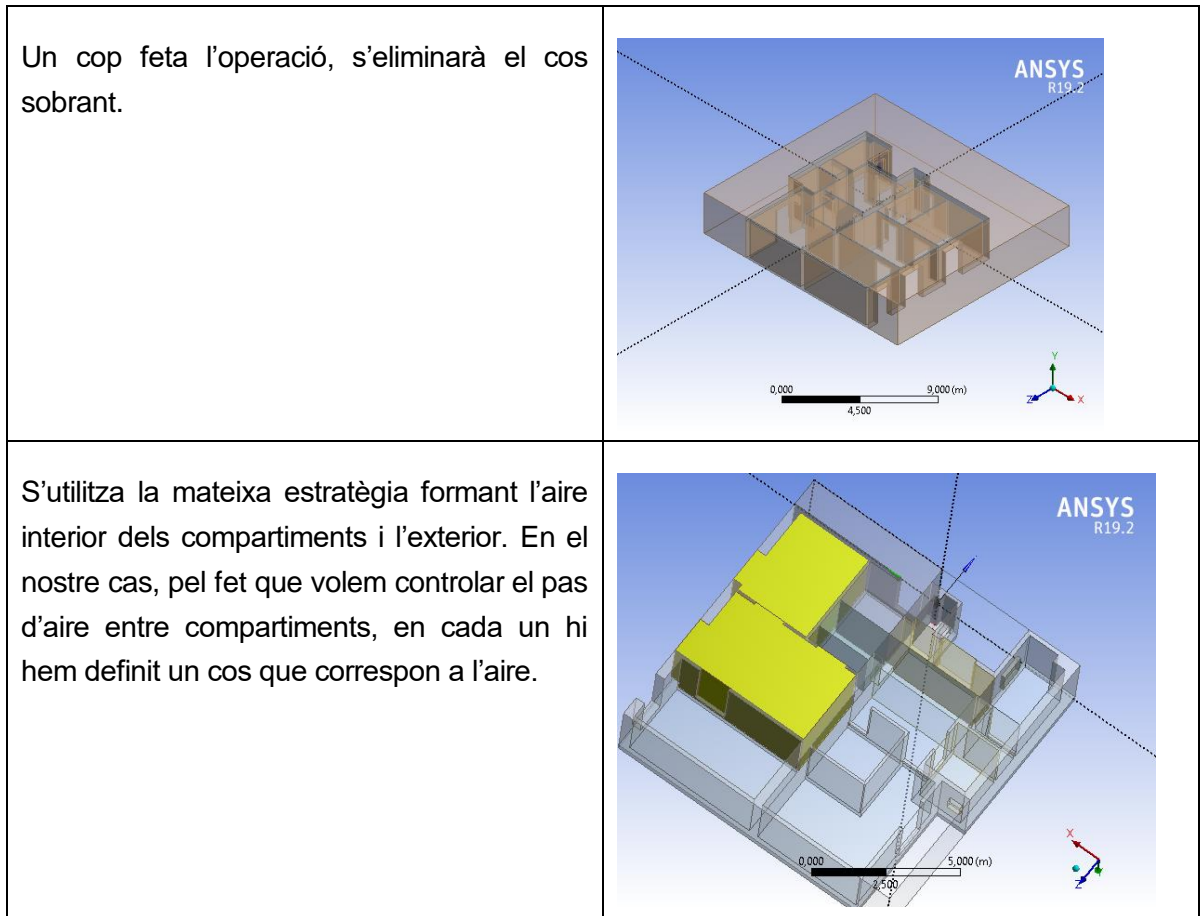


Utilitzarem una nova eina, l'*Slice*. Aquesta serveix per tallar un cos, és a dir separar-lo en dos. L'eina té diferents modes de tall, en aquest cas es tallarà el cub amb les superfícies que formen les parets.

Details View	
Details of Slice1	
Slice	Slice1
Slice Type	Slice by Surface
Target Face	Selected
Slice Targets	Selected Bodies
Bodies	1
Bounded Surface?	No

El resultat d'un tall és el següent.





En total tindrem 16 cossos: 11 que corresponen a l'aire de cada compartiment (a1,a2,...a11), 3 que corresponen a l'aire exterior (b1,b2 i b3), la paret i el sostre. Veure Figura 34.

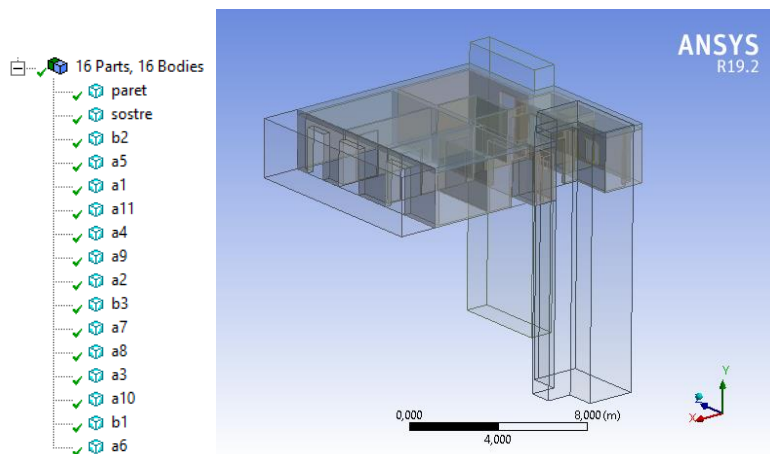


Figura 34: Representació de tots els cossos de la geometria.

3.2.2.4. Reparació de les connexions

Tot i tenir tots els cossos construïts, molts d'aquests no tenen les àrees correctament marcades a la seva superfície (veure Figura 35), per tant caldrà tornar a utilitzar la Booleana *Imprint Faces*. En la Figura 36 veiem el resultat d'aplicar aquesta eina.

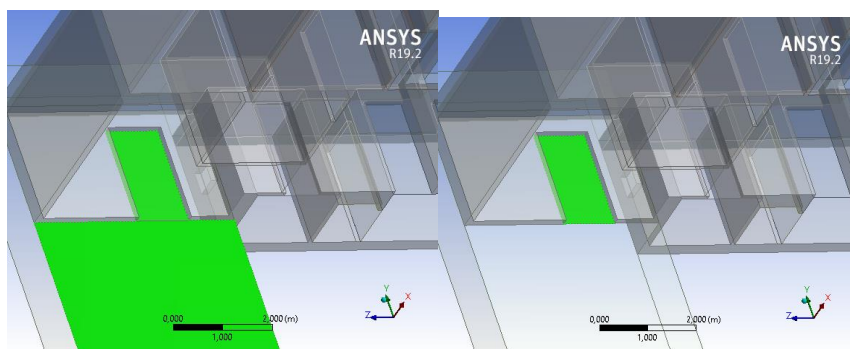


Figura 35: Una sola superfície

Figura 36: Dues superfícies

Per comprovar si les dues àrees –en aquest cas la de l'aire exterior i la de l'aire interior- estan en contacte, emprarem una eina que es diu *Connect*. Seleccionarem les dues àrees i jugarem amb la tolerància fins que la connexió es faci correctament.

Details View	
Details of Connect224	
Connect	Connect224
Connection Type	Faces
Faces	2
Tolerance	0,1 m
Location	Interpolated
T-Junction	Off

Figura 37: Configuració de l'eina *Connect*.

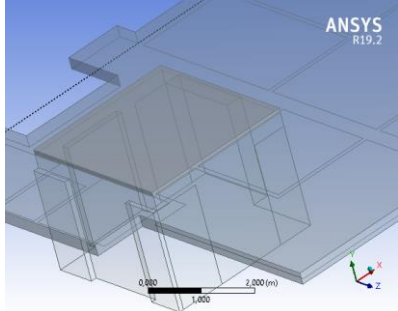
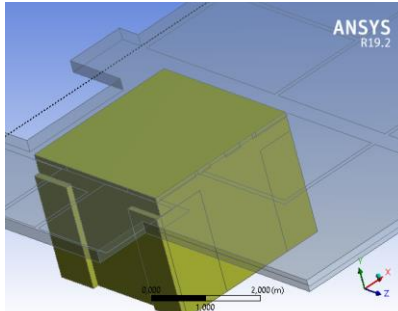
S'hauria de fer la comprovació amb el *Connect* a totes les àrees de dos cossos que estiguin en contacte. No obstant això, si s'està segur que les connexions més problemàtiques estan bé, ja ho podríem donar per vàlid. Quan s'estigui fent el mallat o dins el *Setup* podem adonar-nos si hi ha algun error. Llavors, s'hauria de tornar al *DesingModeler* i corregir-ho.

Moltes vegades, quan es fa el *Connect*, ens apareix un problema (Figura 38):

Details View	
Details of Connect226	
Connect	Connect226
Connection Type	Faces
Faces	2
Tolerance	0,1 m
Location	Interpolated
T-Junction	Off
Number of Connected Sets	0

Figura 38: Detecció d'un problema de connexió.

Això és a causa que les dues àrees no estan en contacte del tot. Es pot corregir de la següent manera:

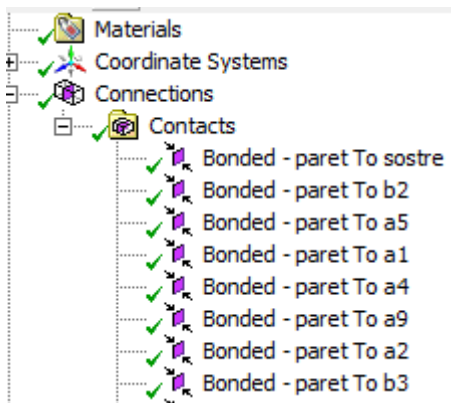
<p>Es fa una extrusió d'una de les dues àrees de manera que hi quedin tres cossos sobreposats.</p>	
<p>Posteriorment, es fa una Booleana d'Unió entre els tres cossos.</p>	
<p>Es fa un <i>Slice</i> tallant on sigui adient. En el nostre cas tallarem respecte a la superfície inferior del sostre.</p>	<p>X</p>
<p>Es torna a fer un <i>Imprint Faces</i>, si s'escau.</p>	<p>X</p>
<p>L'últim pas és la comprovació mitjançant el <i>Connect</i>.</p>	<p>X</p>

En general, aquesta estratègia sol funcionar però si la connexió segueix donant problemes, es pot provar d'extorsionar l'altra àrea, utilitzar una altra superfície de tall o, fins i tot, esborrar el cos que dona problemes i crear-lo de nou. Cada estratègia forma part del problema i només la pràctica amb el DesignModeler fa que s'apliqui la correcta.

3.3. Elaboració de la malla

Abans de començar a mallar la geometria, cal fer dos passos previs dins l'aplicació *Meshing* de l'ANSYS FLUENT: aquests són revisar els contactes i nomenar alguns elements:

3.3.1. Connections



Aquest pas no forma part estrictament del mallat, però és totalment necessari per confirmar si les connexions de superfícies de diferents cossos s'han fet correctament. Es fa entrant a l'apartat *Connections* de l'arbre d'opcions. A la Figura 39, podem veure com automàticament es generen tots els *Contacts* de la nostra geometria –en el nostre cas 45-. Ara cal fer un meticolós procés de comprovació. Aquest es basa en dues parts.

Figura 39: *Contacts* de la geometria.

1. La primera es basa en corroborar que les àrees que participen d'aquesta connexió són les correctes (Figura 40).

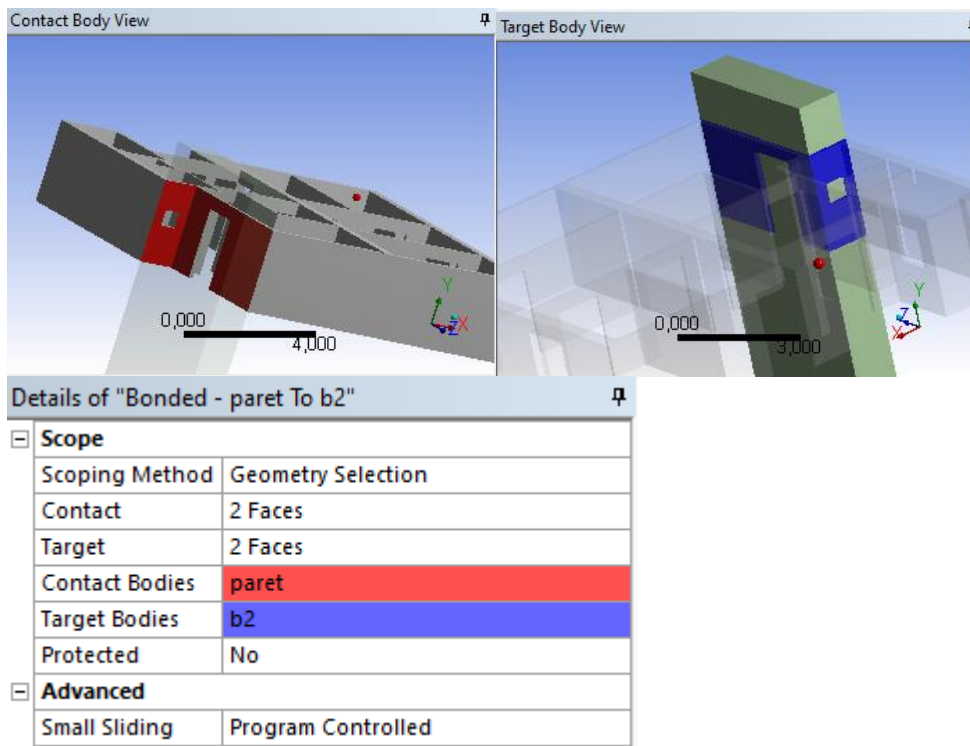


Figura 40: *Comprovació de la selecció automàtica d'àrees.*

- La segona és la que detecta els problemes geomètrics de contacte. Es farà iterativament: suprimint temporalment els contactes que no hagin estat estudiats (veure Figura 41). Es fa emprant un *checking* que té la mateixa aplicació (veure Figura 42). Si no troba cap error, es pot seguir comprovant altres connexions, si en troba, cal tornar a la geometria (DesignModeler) i corregir el problema de la manera que s'explica a l'Apartat 3.2.1.4.

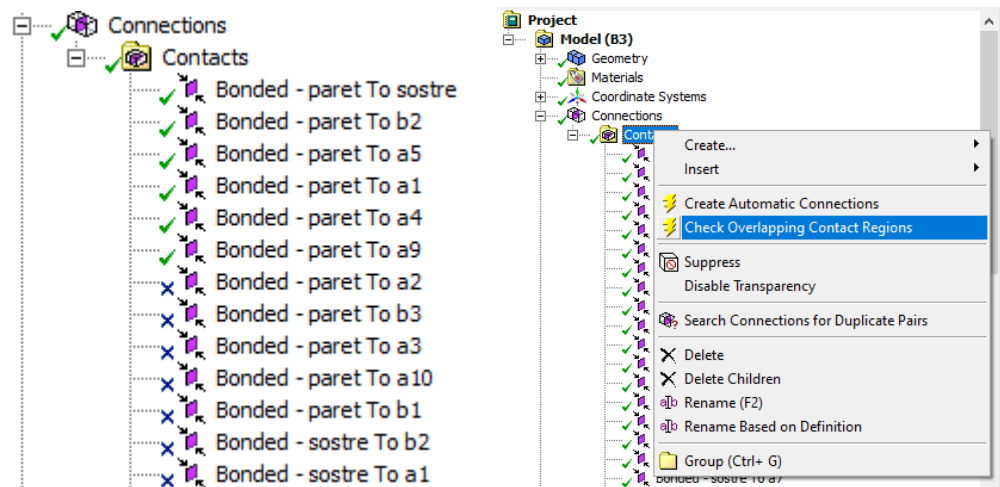


Figura 41: Supressió temporal dels Contacts. Figura 42: Checking de les connexions.

3.3.2. Name Selections

Aquest pas és totalment necessari pels posteriors anàlisis de càlcul i, fins i tot, serveix per començar a incloure condicions de contorn. Es tracta d'anomenar totes les portes, finestres, parets, sostre i terra.

Per les portes i finestres, ja s'ha expressat a la Figura 25 de l'Apartat 3.1.2 com es correspondrien. De moment definirem el *name selection* com a *interior.f_*, d'aquesta manera indicarem que romandran obertes. Si volguéssim tenir-ne alguna de tancada, la definiríem com a *wall.f_*.

En la Figura 43 es veu com s'han definit.

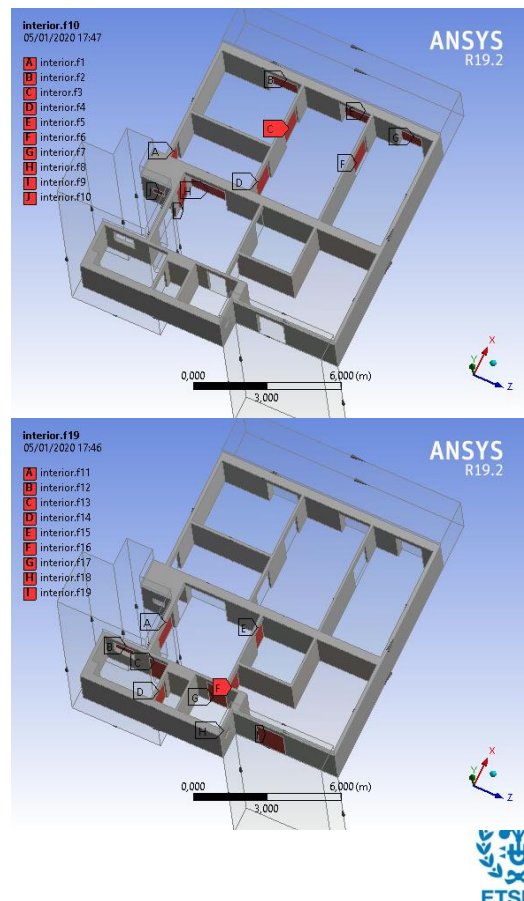


Figura 43: Nominació de les f_.

Anomenarem les parets de la següent manera:

1. Els tancaments –parets que donen a l'exterior- els definirem amb la lletra E. En canvi les parets mitgeres- les que donen a un altre edifici- amb la lletra M. Seguint un ordre horari les anirem nomenant. La superfície de la paret que sigui exterior rebrà el nombre 1, i la que doni dins el nostre pis, el nombre dos. Si per una paret li corresponen una superfície exterior per dues o més d'interior, a les interiors se li afegirà un nombre. Per exemple, la paret M1 té una superfície exterior (M1.1) per dues d'interiors (M1.2.1 i M1.2.2). Veure Figura 44.

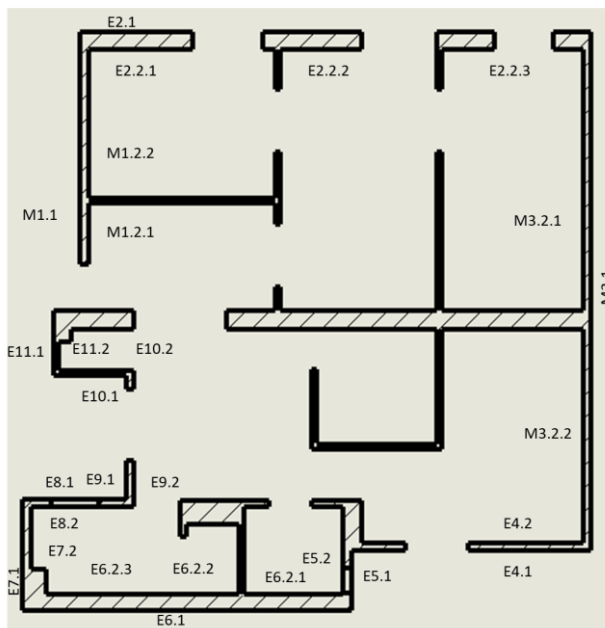


Figura 34: Nominació de parets exteriors.

2. Les particions interiors les anomenarem amb la lletra P. De la mateixa manera, seguirem un ordre horari, i la primera superfície de la paret que ens trobem li assignarem el nombre 1 i l'altra superfície el nombre 2. Si per una mateixa paret, es tenen dues o més superfícies de tipus 1 respecte a una de tipus 2 -o a l'inrevés- s'utilitzarà una altra xifra. Veure Figura 45.

També farem *Name Selections* pel sostre i pel terra, que té 12 superfícies (la de la paret i 11 habitacions) Veure Figura 46 i Figura 47:

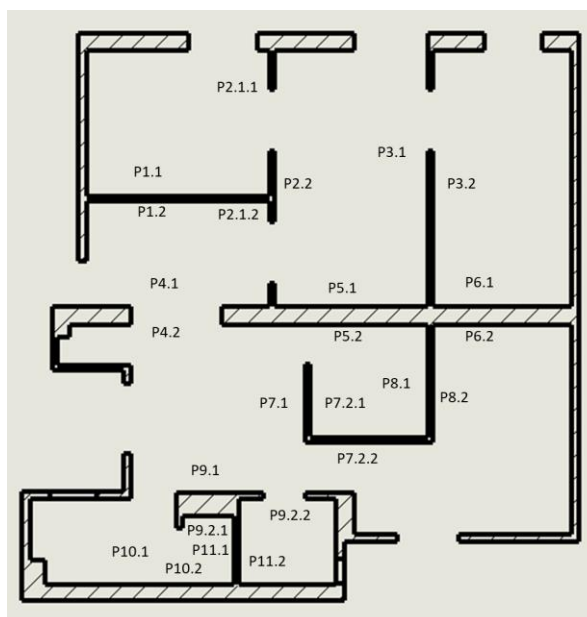


Figura 45: Nominació de les parets interiors.

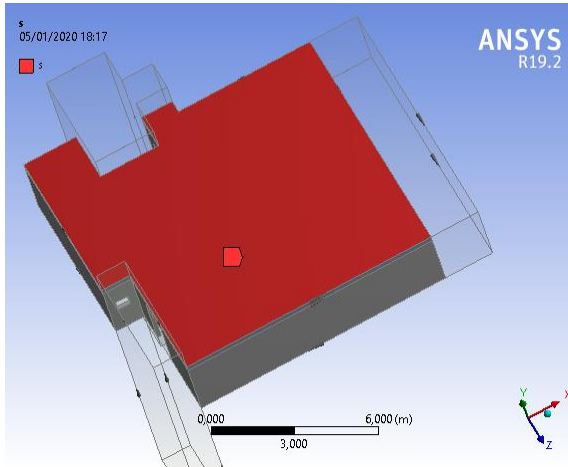


Figura 46: Name selection del sostre

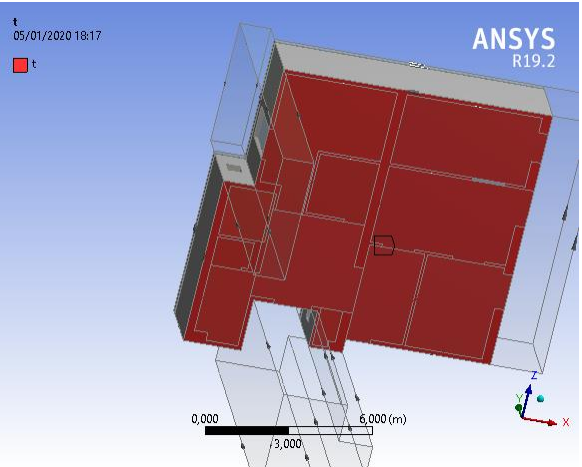


Figura 47: Name selection del terra

Finalment, anomenarem els *inlets* –on es produirà una entrada d'aire- i els *outlets* –on sortirà l'aire. Considerarem *inlets* totes les superfícies que pertanyin a l'exterior i es comportin com a tal: b1 i b2, que són el cos que correspon a l'aire de la façana E2.1 i el que correspon l'aire del pati de dins l'illa –que als ser molt gran el considerem exterior- (veure Figura 48). Per altra banda, considerarem *outlet* el pati interior: b3 (veure Figura 49). Aquests *name selection* com que tindran condicions de contorn de pressió els anomenarem *pressure.inlet/outlet.nom*.

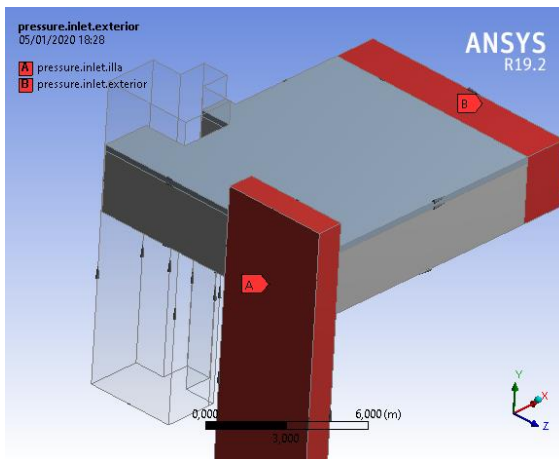


Figura 48: Name selection dels inlets.

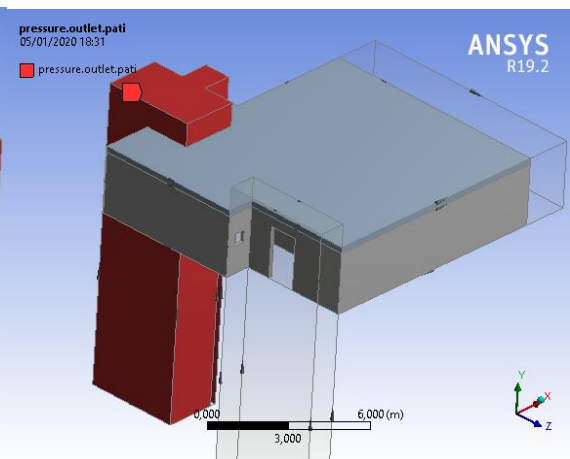


Figura 49: Name selection dels outlets.

3.3.3. Mesh

En aquest apartat s'explicarà com s'ha mallat la nostra geometria. Tenim 4 tipus de cossos: aire interior, aire exterior, parets i sostre; per tant, s'ha decidit que cadascun es mallarà d'una manera. Veure Figura 50. Recordem que l'objectiu principal és optimitzar la densitat de malla,

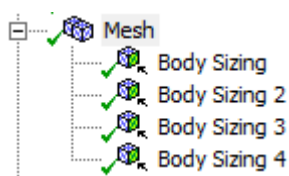


Figura 50: Tipus de mallats aplicats.

és a dir, reduir el nombre d'elements necessaris per extreure bons resultats. Això s'ha aconseguit fixant el mallat de l'aire exterior, de les parets i del sostre, i modificant el de l'aire interior. El mallat El cos que més influirà en l'anàlisi serà l'aire interior (a1,a2,...a11), i per tant resulta molt interessant estudiar en detall aquest mallat.

3.3.3.1. Aire exterior

L'aire exterior correspon a 3 cossos: b1,b2 i b3. Aquest és totalment necessari considerar-lo per configurar el nostre problema, però els resultats específics no són del nostre interès. El que realment és rellevant és conèixer les temperatures o la ventilació de l'interior del pis, així que el mallat de l'aire exterior serà més bast respecte el de l'aire interior.

Per aquests tres cossos, s'ha utilitzat un *Sizing* amb una mida d'element de 0,2m. Els altres paràmetres, com el comportament o el creixement, els deixarem per defecte. A més, mantindrem desactivades les opcions de detectar curvatura i proximitat, ja que aquests cossos no tenen cares o arestes estretes ni formes circulars. Veure Figura 51.

Details of "Body Sizing" - Sizing	
☐ Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	3 Bodies
☐ Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	0,2 m
☐ Advanced	
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (5,5884e-003 m)
Behavior	Soft
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,2)
Capture Curvature	No
Capture Proximity	No

Figura 51: Configuració del Sizing per l'aire exterior.

A la Figura 52, il·lustrem de forma explícita a quins cossos li apliquem el mètode de mallat:

Sostre

Per mallar el sostre s'ha utilitzat l'estudi fet per Gerard Muñoz [27], el qual també analitzava una altre habitatge del mateix edifici i justificava una mida òptima d'element pel sostre de 0,2m. Veure Figura 53.

3.3.3.2. Pareds

El cos que representa les parets és de grans dimensions però té algunes superfícies molt primes. El gruix de les parets és d'entre 0,35m i 0,15m, llavors si no utilitzem cap aplicació avançada, només s'hi crearan entre 1 i 2 elements en aquest ample. Tan pocs elements es consideren insuficients, per calcular el flux de calor per conducció a partir del mètode de volums finits. Per tant, el mètode *Sizing* es configurarà de la següent manera:

Gerard Muñoz també va justificar en el seu estudi una malla òptima per la paret [27]. La mida de l'element és de 0,1m i mantindrem la ràtio de creixement a 1,2. Activarem el detector de proximitat perquè detecti les cares que corresponen al gruix de la paret. Entre aquest espai assignarem que hi ha d'haver almenys 4 elements. Veure Figura 54.

A la Figura 55 s'observa el mallat de les parets. Notem que hi ha més nombre d'elements a les parts més primes, ja que s'ha establert la condició esmentada.

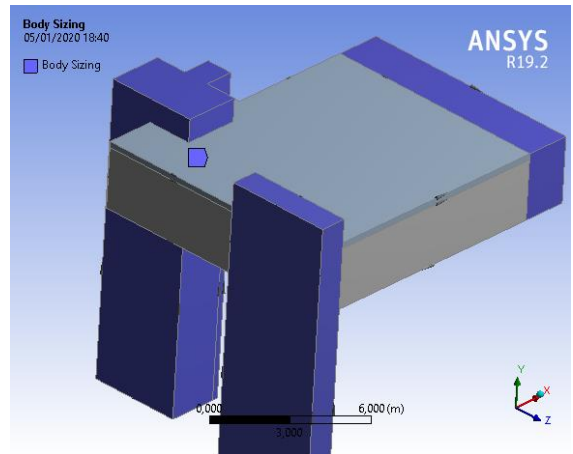


Figura 42: Cossos considerats aire exterior.

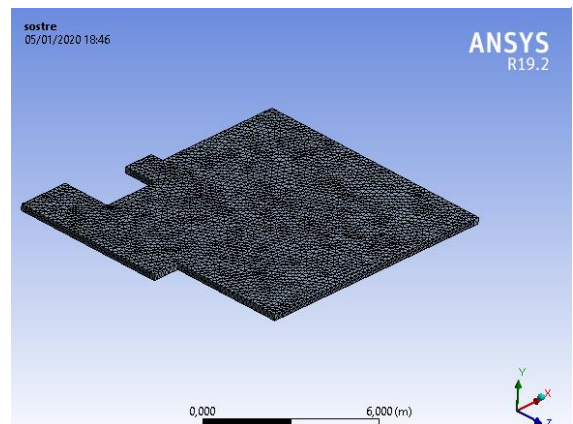


Figura 53: Mallat del sostre.

Details of "Body Sizing 2" - Sizing	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	0,1 m
Advanced	
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (5,5884e-003 m)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,2)
Capture Curvature	No
Capture Proximity	Yes
<input type="checkbox"/> Proximity Min Size	Default (1,1177e-002 m)
<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap	4
Proximity Size Function Sources	Faces

Figura 54: Configuració del Sizing per les parets.

Veiem que en qualsevol paret com a mínim es crearan 4 elements transversals.

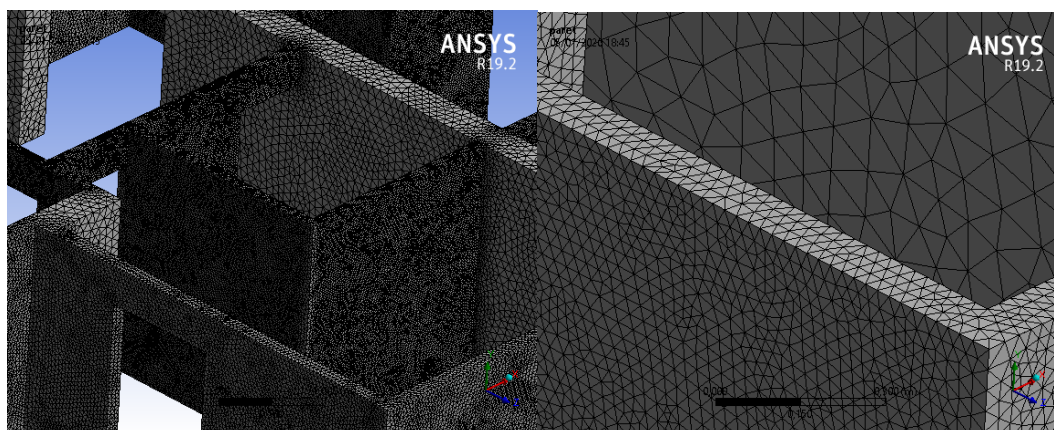


Figura 55: Mallat de les parets.

Fent un plànol general de tots els cossos mallats fins el moment, observem que la malla és molt més fina a les parets que al sostre i a l'aire exterior. Veure Figura 56.

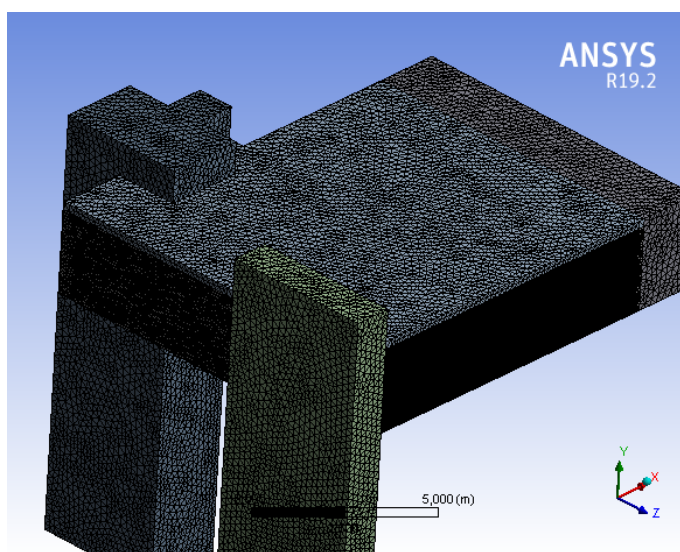


Figura 56: Mallat de tota la geometria.

3.3.3.3. Aire interior

Als 11 cossos de l'aire interior, també se li aplicarà un *Sizing*, només modificant la mida de l'element. Tot i així, tal com ja hem mencionat abans, per l'aire interior es farà un estudi de malla: s'analitzarà el comportament de diferents mallats –amb diferents mides d'element- per trobar-ne el més òptim. És a dir, es pretén trobar la mida d'element més petita possible per poder fer simulacions amb bons resultats.

En total, s'han fet 5 tipus de mallat, amb les següents mides d'element: 0,2m; 0,175m; 0,15m; 0,125m i 0,1m.

Ara cal trobar quina mida d'element seria la més òptima. Per això mateix, es simularan 5 casos, pels 5 mallats, amb les mateixes condicions de contorn i s'analitzarà el comportament de cadascun. Veure Figura 57.

L'elecció de quina malla és la més òptima es farà de la següent manera: es trobaran valors de temperatura, velocitat i calor en diferents punts i superfícies per cada mallat. Llavors, tindrem una gràfica on aquests valors seran dependents de la densitat de malla:

$$\rho_m = \frac{\#elements}{Volum} \quad \text{Eq 3.3.1}$$

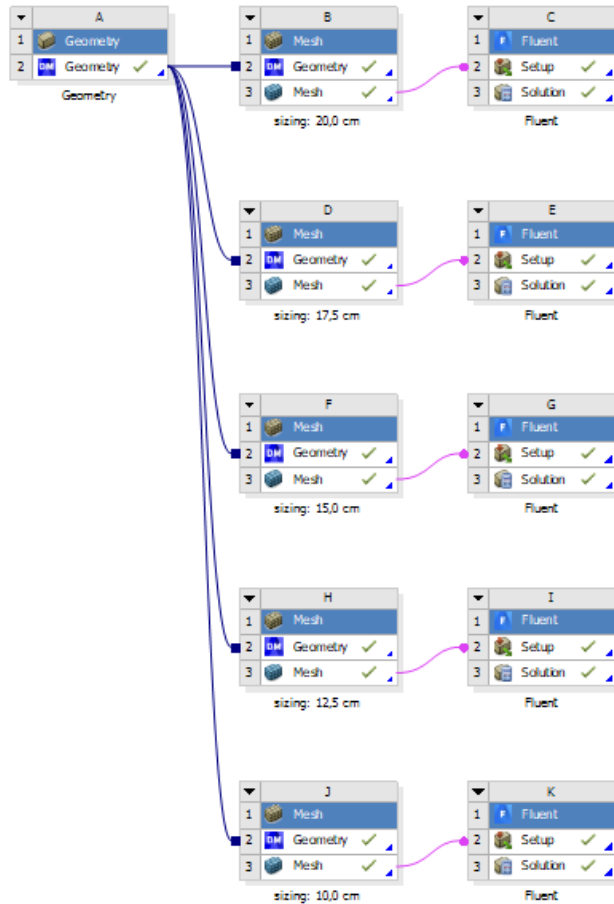


Figura 57: Arbre de muntatge dels casos.

Arriba un moment en què per molt que hi hagi una major densitat de malla, el valor (de temperatura, velocitat o calor) es manté contant. Aquesta densitat de malla seria la més òptima. La mida d'element més òptima serà la que correspongui aquesta densitat de malla.

En les Conclusions, s'exposarà quina és aquesta mida d'element.

A la Figura 58 s'observa el mallat de l'aire interior d'una de les 6 configuracions presentades.

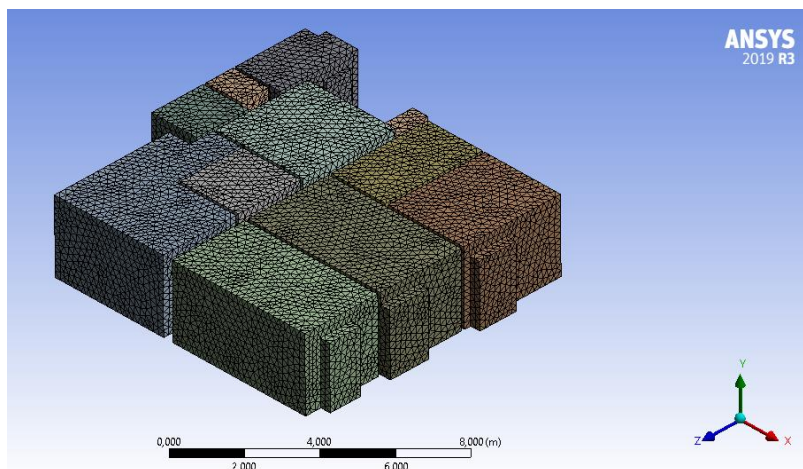


Figura 58: Mallat de l'aire interior.

3.4 Configuració

En aquest moment, per tenir el model totalment definit, s'ha d'escollir una mida d'element per la malla de l'aire. Per aquesta raó es farà una simulació on es desactivaran tots els altres cossos. La manera en què s'ha mallat l'aire exterior, el sostre i les parets, no és rellevant per fer l'estudi de convergència de malla. Es presentaran quines condicions de contorn que s'han utilitzat per fer aquest estudi. A l'Apartat 4 es discutiran els resultats obtinguts per la simulació.

3.4.1. Condicions de contorn

3.4.1.1. Models

En aquest apartat es defineixen els models físics que s'utilitzaran. Només activarem el model de l'Energia perquè en la nostra anàlisi fluidodinàmica l'intercanvi de calor és molt rellevant. Mantindrem el flux laminar –ja que les velocitats de ventilació són molt baixes- i desactivada la radiació. Quan es defineixi completament la malla i es vulguin realitzar simulacions complexes, activaríem aquesta opció, però per fer l'estudi de convergència de malla no és necessari. Es pretén simplificar el màxim les condicions de contorn perquè l'objectiu no és simular un cas exacte sinó trobar el mallat més òptim per l'aire interior.

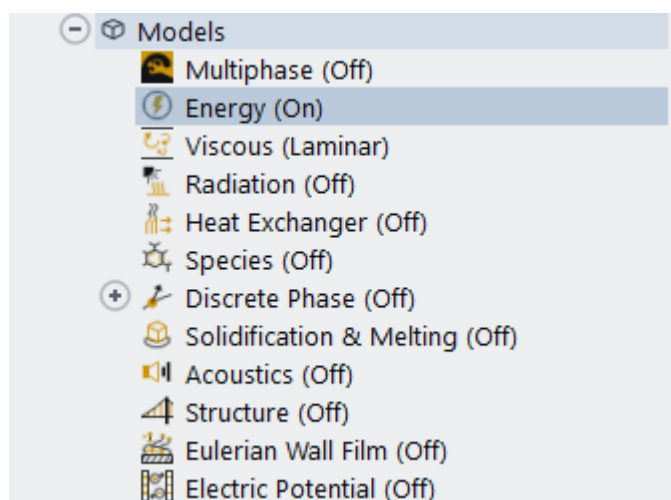


Figura 59: Models utilitzats.

Per altra banda, a la pàgina del *Setup General*, se li afegirà una acceleració de $-9,81\text{m/s}^2$ en direcció y deguda a la gravetat.

3.4.1.1.1. Model de Radiació

En un futur, resultaria molt interessant incorporar la radiació, sobretot per fer simulacions que representin l'estiu. Per tant, tot i que no s'utilitzarà en el nostre estudi, s'ha plantejat com s'hauria de configurar la radiació.

Utilitzarem un model de radiació P1 amb 0 bandes. El software disposa d'una calculadora solar que depenent de les coordenades (longitud i latitud), de l'orientació de la malla i del dia i de l'hora, s'aïlla la irradiació de cada punt del model. El dia i l'hora serà configurada en el moment en què es realitzi un futur estudi, però el què sí que es mantindrà constant seran les coordenades i l'orientació de la malla:

Per trobar les coordenades, s'ha utilitat GoogleMaps. Que són: $41^{\circ}22'41.0''N$ $2^{\circ}10'16.4''E$; o el què és el mateix: 41.378066, 2.171233 °.

En canvi, per saber l'orientació de la malla s'han hagut de fer més operacions:

1. S'ha sobreposat –mitjançant PowerPoint- el mapa d'urbanisme de Barcelona amb el croquis del nostre habitatge. El programa té una eina que permet orientar un element respecte a l'altre. Primer s'han col·locat el vector N i el vector X verticalment i després s'ha orientat el vector X respecte a l'N fins que coincidia amb la direcció que a la geometria hem definit que tenia. Ens ha sortit 39° . D'aquesta manera sabem que l'angle entre Z i E serà el complementari: 61° . Veure Figura 60.

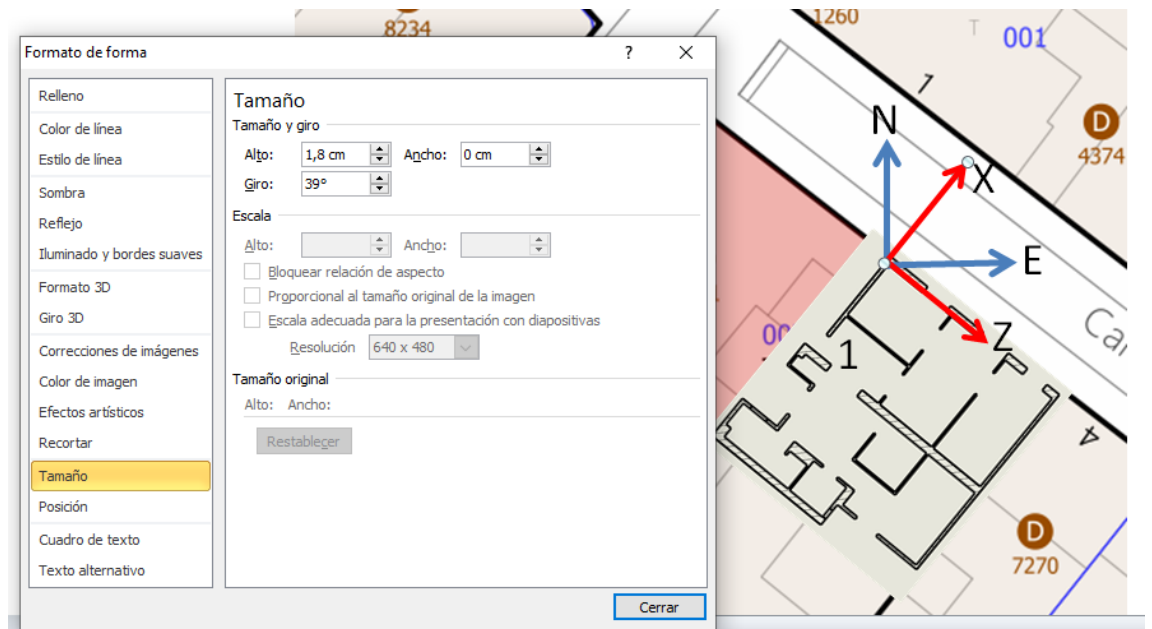


Figura 60: Càlcul de la inclinació de X i Z respecte N i E.

2. Coneixent els angles, podem calcular els vectors unitaris que descomponen el vector N i el vector E. S'ha trobat de la següent manera:

$$[\hat{x}]_N = \cos(39) = 0,777$$

$$[\hat{z}]_N = -\sin(39) = -0,629$$

$$[\hat{x}]_E = \sin(39) = 0,629$$

$$[\hat{z}]_E = \cos(39) = 0,777$$

3. Finalment, s'introdueixen tots aquests valors dins la Calculadora Solar. Veure Figura 61:

Figura 61: Configuració de la Calculadora Solar.

3.4.1.2. Materials

ANSYS Fluent, disposa d'una base de dades amb una gran quantitat de materials –per sòlids i per fluids- amb les seves propietats físiques. Nosaltres triarem dos materials: l'aire i l'alumini.

Pot resultar sorprenent que si hem desactivat les parets i el sostre, utilitzem l'alumini. Tot i així, aquest material no serà aplicant en cap dels 11 cossos que tenim al model, sinó que serveix per establir condicions de contorn. Així a totes les superfícies que no tingui contacte amb cap altre sòlid se li assignaran les propietats físiques de l'alumini. S'ha escollit l'alumini perquè és el que el programa assigna per defecte.

Per altra banda, hi tenim l'aire, el qual assignarem com a material per tots els cossos. Hem modificat les propietats que venen per defecte, resultant així (veure Figura 62):

- A la densitat li hem assignat un model de gas ideal incompressible. Així, aquesta dependrà de la temperatura.
- La calor específica, la conductivitat tèrmica i el pes molecular romandran constant amb els valors per defecte.
- La viscositat seguirà el model *Power Law*. És un altre model, respecte al newtonià expressat:

$$\tau = K \left(\frac{dv}{dy} \right)^n$$

Eq 3.3.2, on en el nostre cas $K= 1,716e-05$ i $n=0,666$.

Property	Model	Value
Density (kg/m3)	incompressible-ideal-gas	
Cp (Specific Heat) (j/kg-k)	constant	1006.43
Thermal Conductivity (w/m-k)	constant	0.0242
Viscosity (kg/m-s)	power-law	
Molecular Weight (kg/kmol)	constant	28.966

Figura 62: Propietats de l'aire.

3.4.1.3. Portes i finestres

Com ja s'ha comentat a l'apartat 4.3.2, es consideraran totes les portes i finestres obertes. Per això, s'han definit els *Name Selections* com a *interior.f_*. El color groc de la Figura 64 expressa que hi ha una connexió entre dos cossos, i és aquí on s'estableix aquesta condició.

També a l'apartat 4.3.2 es van definir *Name Selections* per establir on hi hauria pressió positiva i pressió negativa. Es van seleccionar les cares exteriors del cos b1 i b2 com a *pressure.inlet* i les del b3 com a *pressure.outlet*. Com hem desactivat aquests tres cossos, s'ha de tornar a entrar a la configuració de la malla i crear nous *Name selections*. S'han definit de la següent manera (veure Figura 63).

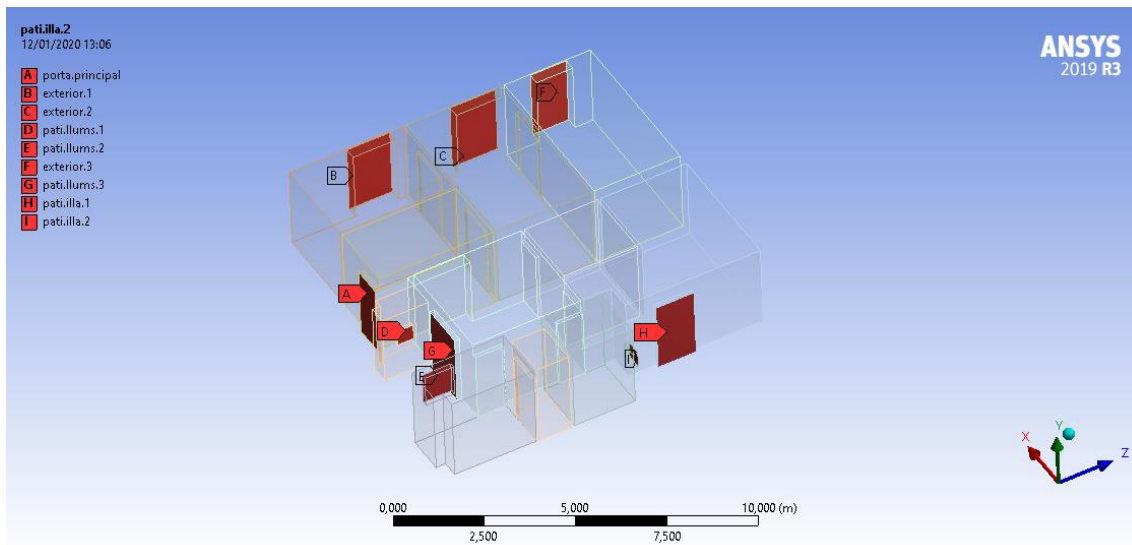


Figura 63: Name selections per als inlets i outlets.

Segons l'anomenació que s'ha fet a l'Apartat 3.1.2:

- F1 es dirà “porta.principal”.
- F2 es dirà “exterior.1”.
- F5 es dirà “exterior.2”.
- F7 es dirà “exterior.3”.
- F10 es dirà “pati.l·lums.1”.
- F12 es dirà “pati.l·lums.2”.
- F11 es dirà “pati.l·lums.3”.
- F19 es dirà “pati.illa.1”.
- F18 es dirà “pati.illa.2”.

Aquesta vegada, serà al *Setup* on es definirà cada *Name selection* com a *inlet* o *outlet*:

- exterior.1, exterior.2, exterior.3, pati.illa.1, pati.illa.2 i porta principal seran *inlets* amb una pressió relativa de 0Pa. A la Figura 64 s'expressa de color blau.
- pati.l·lums.1, pati.l·lums.2 i pati.l·lums.3 seran *outlet* amb una pressió relativa de -5Pa. A la Figura 64 s'expressa de color vermell.

Cal mencionar que s'ha afegit un *inlet* respecte l'Apartat 4.3.2, perquè l'aire tingui més moviment i faciliti l'estudi de la malla.

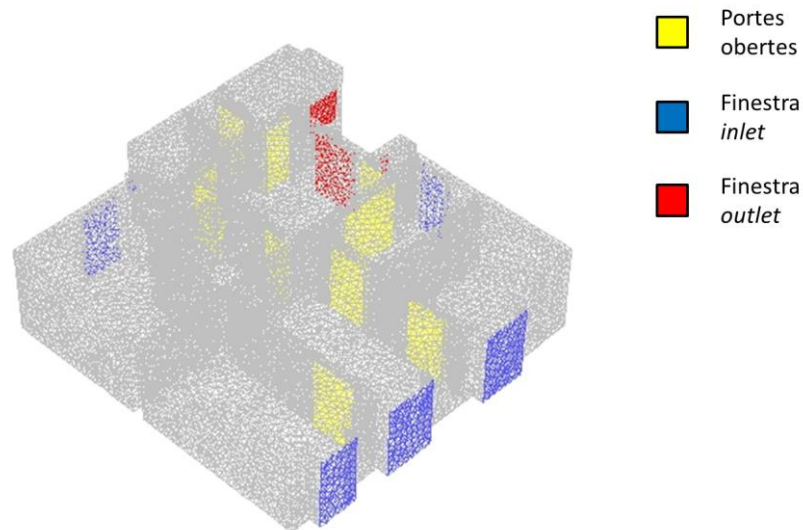


Figura 64: Configuració de les portes i finestres del pis.

3.4.1.4. Sostre i terra

De la mateixa manera, com hem desactivat el sostre, caldrà tornar a l'elaboració de la malla i crear un nou *Name selection* pel sostre, aquest tindrà 11 cares.

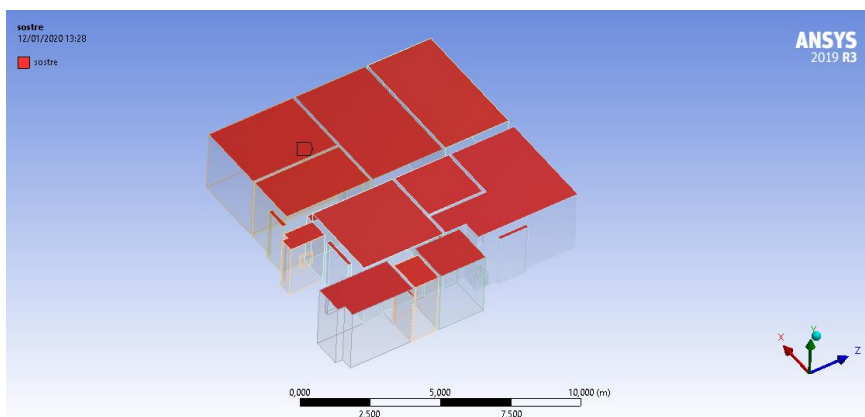


Figura 65: Nou Name selection pel sostre.

Al sostre li assignarem un flux de calor entrant de $150\text{W}/\text{m}^2$ que simuli l'efecte de la radiació (veure Figura 66). Se li aplicarà aquesta condició a les parets de la Figura 67.

Thermal Conditions

Heat Flux
 Temperature
 Convection
 Radiation
 Mixed
 via System Coupling
 via Mapped Interface

Heat Flux (w/m^2) 150

Wall Thickness (m) 0

Heat Generation Rate (w/m^3) 0

Shell Conduction 1 Layer Edit...

Material Name
aluminum Edit...

- sostre-a1 (wall, id=53)
- sostre-a10 (wall, id=61)
- sostre-a11 (wall, id=54)
- sostre-a2 (wall, id=57)
- sostre-a3 (wall, id=60)
- sostre-a4 (wall, id=55)
- sostre-a5 (wall, id=52)
- sostre-a6 (wall, id=62)
- sostre-a7 (wall, id=58)
- sostre-a8 (wall, id=59)
- sostre-a9 (wall, id=56)

Figura 66: CC1, flux de calor.

Figura 67: Elements implicats a CC1.

Al terra li assignarem una convecció de $8\text{W}/\text{m}^2\text{-K}$ que simularà l'intercanvi amb l'aire del pis de baix (Figura 68). Se li aplicarà aquesta condició a les parets de la Figura 69.

Thermal Conditions

Heat Flux
 Temperature
 Convection
 Radiation
 Mixed
 via System Coupling
 via Mapped Interface

Heat Transfer Coefficient ($\text{w}/\text{m}^2\text{-k}$) 8

Free Stream Temperature (k) 298

Wall Thickness (m) 0

Heat Generation Rate (w/m^3) 0

Shell Conduction 1 Layer Edit...

Material Name
aluminum Edit...

- terra-a1 (wall, id=42)
- terra-a10 (wall, id=50)
- terra-a11 (wall, id=43)
- terra-a2 (wall, id=46)
- terra-a3 (wall, id=49)
- terra-a4 (wall, id=44)
- terra-a5 (wall, id=41)
- terra-a6 (wall, id=51)
- terra-a7 (wall, id=47)
- terra-a8 (wall, id=48)
- terra-a9 (wall, id=45)

Figura 68: CC2, convecció .

Figura 69: Elements implicat a CC2.

La temperatura inicial del sostre i del terra és de 298K

3.4.2. Monitors

Un cop establertes totes les condicions de contorn, caldrà incorporar monitors perquè mentre s'estigui fent la simulació puguem controlar alguns valors. D'aquesta manera podem saber si s'està desenvolupant correctament.

El primer monitor ens dona informació de l'àrea mitjana ponderada (*Area-Weighted Average*). L'utilitzarem per conèixer la temperatura mitjana dels *outlets*. És a dir, podrem conèixer la temperatura de les tres finestres que donen al pati interior: *pati.llums.1*, *pati.llums.2* i *pati.llums.3*. Es configura de la següent manera:

Report Type
Area-Weighted Average

Custom Vectors
Vectors of
Custom Vectors...

Field Variable
Steady Statistics...
Mean Static Temperature

Surfaces Filter Text [Icons]
interior-part-a8
interior-part-a9
- Outlet
 pati.llums.1
 pati.llums.2
 pati.llums.3
- Wall
 sostre-a1

Highlight Surfaces
New Surface

El segon monitor és del mateix tipus i està aplicat a les mateixes tres finestres però calcularà una altra magnitud: la velocitat mitjana. Es configura de la següent manera:

Report Type
Area-Weighted Average

Custom Vectors
Vectors of
Custom Vectors...

Field Variable
Steady Statistics...
Mean Velocity Magnitude

Surfaces Filter Text [Icons]
interior-part-a8
interior-part-a9
- Outlet
 pati.llums.1
 pati.llums.2
 pati.llums.3
- Wall
 sostre-a1

Highlight Surfaces
New Surface

El tercer monitor s'aplica al terra i calcula el flux mitjà que passa per la paret. Se seleccionen les 11 parets amb el nom terra--a_. Es configura de la següent manera:

Report Type
Area-Weighted Average

Custom Vectors
 Vectors of

 Custom Vectors...

Field Variable
 Steady Wall Statistics...
 Mean Surface Heat Flux

Surfaces ⊞ ↺ ✓ ✕

terra-a1
terra-a10
terra-a11
terra-a2
terra-a3
terra-a4
terra-a5
terra-a6

Highlight Surfaces

New Surface

La raó per la qual hem situat els monitors a les superfícies indicades és perquè les finestres del pati de llums tenen una ventilació assegurada pel fet que és l'únic *outlet* i, per tant, es produiran canvis tèrmics i fluidodinàmics. El flux de calor també és un paràmetre interessant que dependrà de la malla que farà de transmissora d'informació – des del sostre al terra-.

3.4.3. Especificacions de l'ordinador computacional

Per realitzar tots els càlculs s'ha fet servir un ordinador extern. Aquest disposa d'un processador Intel Core i78565U de 8 nuclis, el què permet fer 8 càlculs en paral·lel. A més a més, té una freqüència dinàmica màxima de gràfics de d'1,8 GHz. Amb el nostre ordinador personal no hauria estat possible fer les simulacions.

Com ja s'ha comentat, s'han efectuat 5 simulacions: 5 mallats diferents amb les mateixes condicions de contorn. Abans de posar-ho en marxa vam acordar que el temps de càlcul seria de 8 hores de mitja. Finalment, algunes d'elles han sobrepassat les 12 hores, però n'hi ha d'altres que -com s'observava un comportament estable- s'ha parat a les 3 hores.

4. RESULTATS

Aquest apartat està dividit en dos blocs: un primer en què s'analitza el comportament energètic del nostre model i un segon en què comparem els resultats de les 5 simulacions.

4.1. Resultats qualitius de la simulació:

Per adquirir una visió més ample del cas d'estudi, resulta molt interessant analitzar el comportament tèrmic i el moviment de l'aire. Aquesta anàlisi és purament qualitativa ja que: per una banda encara no s'ha escollit un mallat per l'aire interior, i per altra banda s'han establert unes condicions de contorn extremadament senzilles i allunyades de la realitat. Recordem que al desactivar els sòlids i l'aire exterior, no es tindrà en compte la conducció a les parets i al sostre, ni el moviment del fluid a l'exterior. Per tant, cal remarcar que en cap cas es realitzarà una anàlisi energètica del pis, llavors el què analitzarem és purament una aproximació. Tot i així, amb aquest projecte s'ha aconseguit construir un model que, amb les condicions de contorn adients i activant tots els sòlids amb el seu correspost mallat, serviria per simular amb resultats verídics el comportament energètic del pis.

De forma arbitrària, per l'aire interior s'ha fet servir un mallat amb una mida d'element de 15cm.

4.1.1. Ventilació

Dintre del bloc de Resultats, hi ha una eina gràfica que representa les línies de flux: les *pathlines*. A la Figura 70 es representen aquestes línies de d'una perspectiva isomètrica del pis:

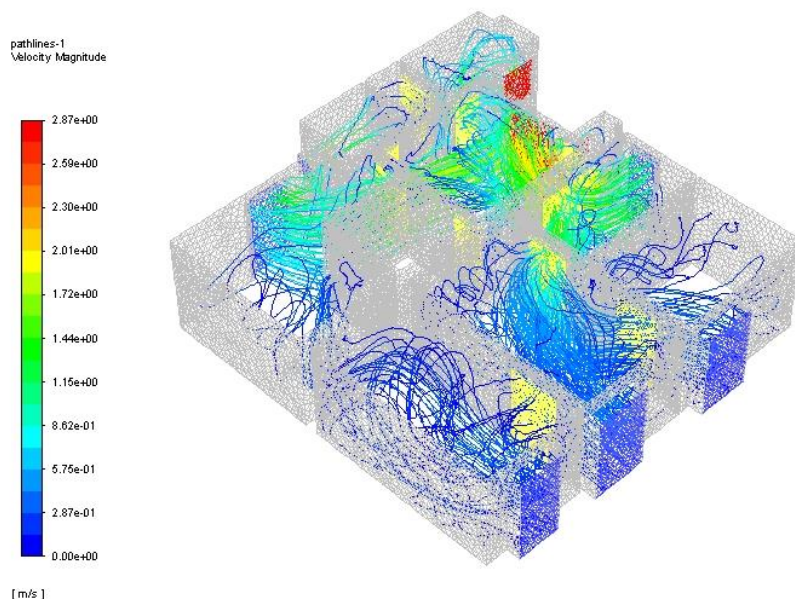


Figura 70: Línies de flux.

A la Figura 71 s'observen les mateixes línies però en planta. Es pot explicar qualitativament el moviment de l'aire de la següent manera. Les 4 entrades de color blau són els *inlets* i és per on entra l'aire. Aquest buscarà una sortida fins que troba les tres finestres del pati interior

outlets, que tenen una pressió negativa. El flux que entra per f1,f2,f5 i f7 s'ajunta a la porta f8. Per tant, com la secció per on ha de passar el fluid és més petita que la suma de les seccions f1,f2,f5 i f7, la velocitat a f8 ha de ser major que la d'entrada. Això és perquè s'ha de complir el principi de conservació de la massa: el cabal d'entrada és el mateix que el de sortida mentre el flux sigui estacionari.

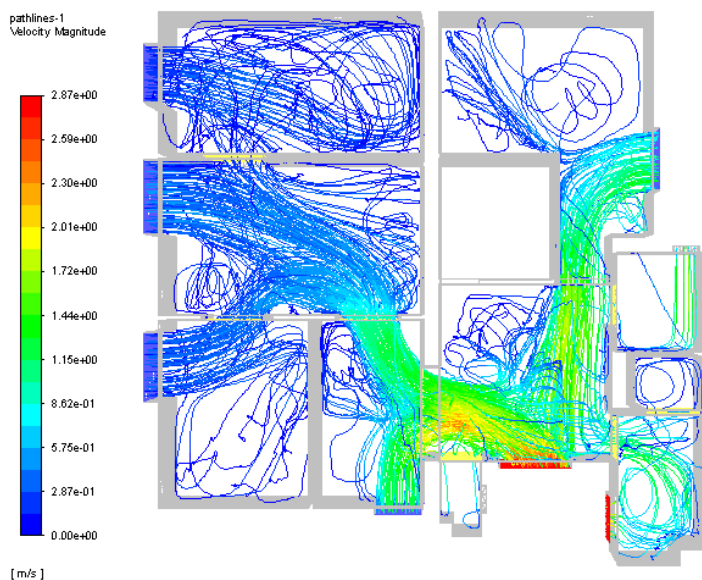


Figura 71: Línies de flux en planta.

Una altra observació interessant és que a causa de la velocitat que té el fluid quan passa per f16 i pel fet de tenir un *outlet* just devora, les línies de flux no es desvien gens. Això provoca que l'habitació a7 no tingui pràcticament ventilació. De fet, aquest compartiment està destinat a traster, per tant no és una zona habitable. Si fos un dormitori, segurament no compliria amb els requisits de qualitat de l'aire. Veure Figura 72.

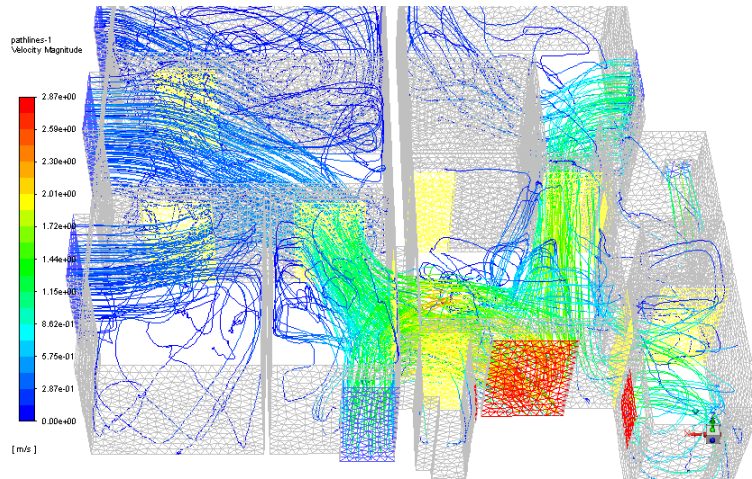


Figura 72: Les línies de flux no passen per a7.

Per acabar, també és d'interès observar més detingudament la trajectòria de les línies de flux. Aquestes no segueixen un moviment rectilini o curvilini sinó que dibuixen una trajectòria molt difícil d'expressar. Veure Figura 73.

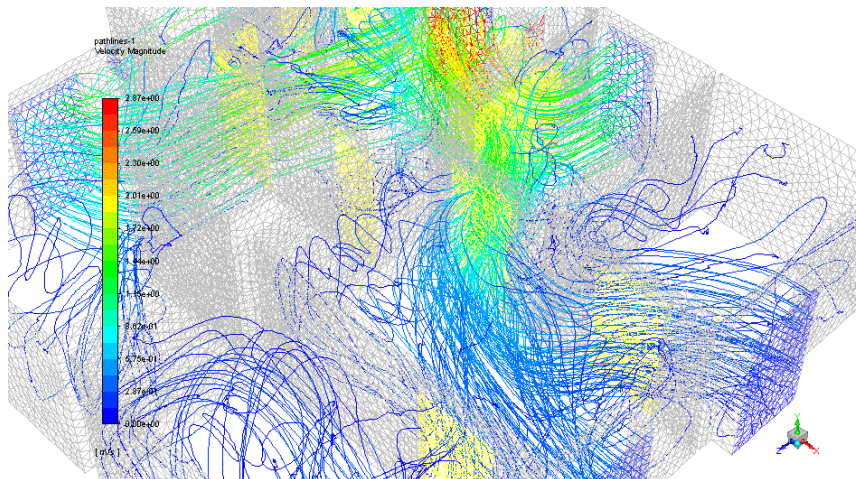


Figura 73: Zoom de les línies de flux.

4.1.2. Temperatures

Per fer l'anàlisi de les temperatures del pis, s'han creat 4 plans paral·lels a la planta i a diferent alçada: El primer està a 0,5m, el segon a 1m, el tercer a 1,5m i el quart a 2m. Utilitzant una eina que permet dibuixar un mapa colors per representar diferents valors d'un paràmetre escalar, trobem les següents figures:

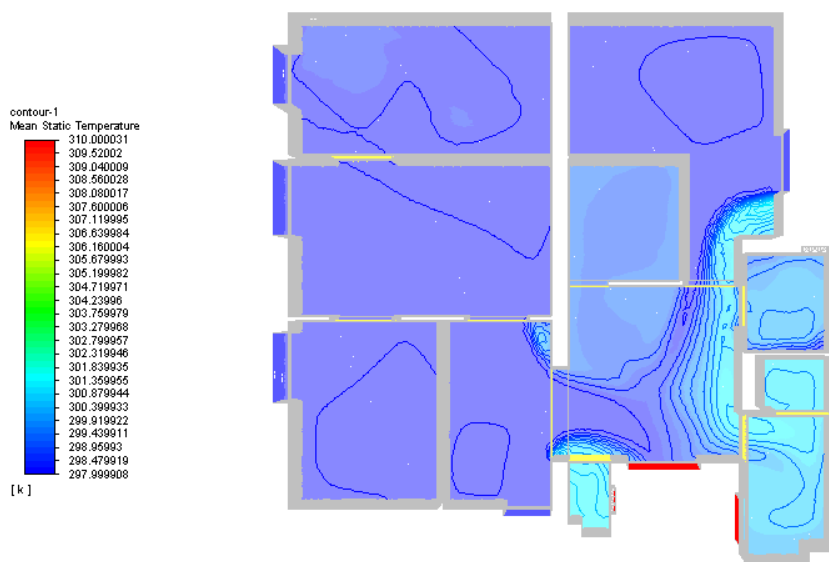


Figura 74: Mapa de temperatures a 0,5m d'alçada.

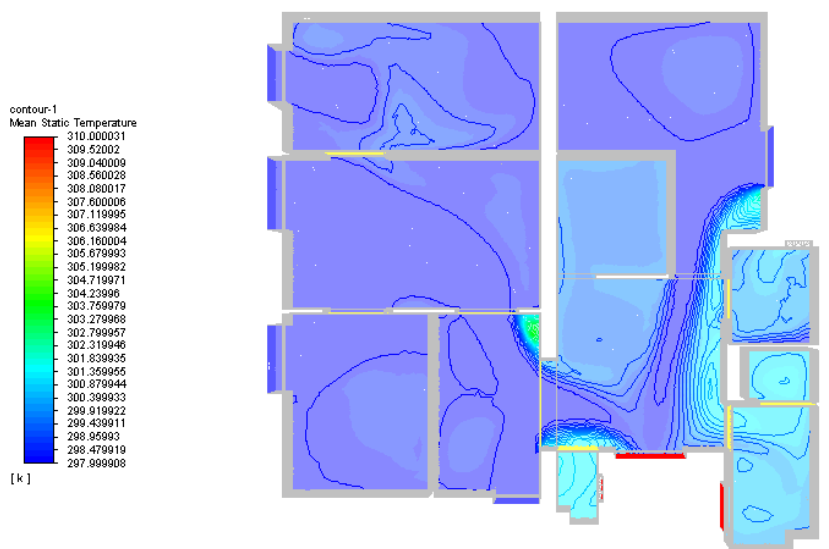


Figura 75: Mapa de temperatures a 1m d'alçada.

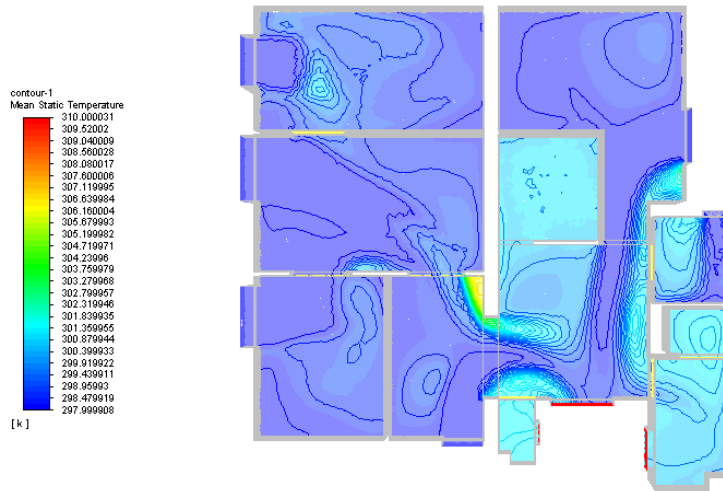


Figura 76: Mapa de temperatures a 1,5m d'alçada.

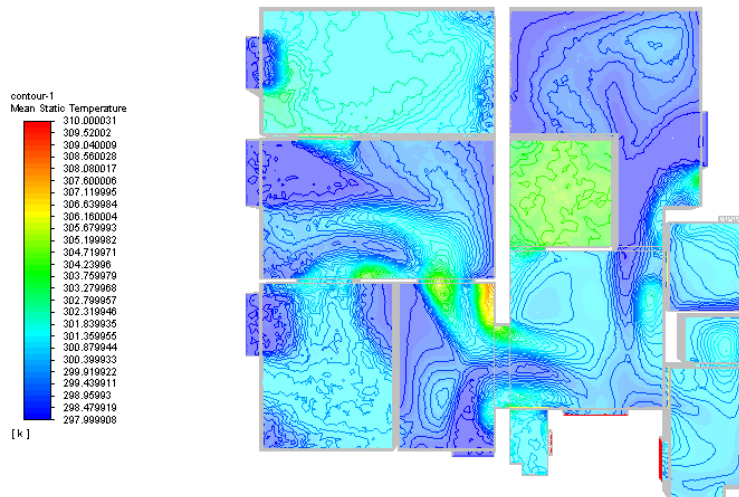


Figura 77: Mapa de temperatures a 2m d'alçada.

En general, observem que els compartiments a7, a9, a10 i a11 tenen unes temperatures més elevades que els altres. Això és a causa que no tenen cap *inlet* que impulsi el fluid cap a fora i aquest extregui la calor. Notem que l'a7 a l'estar tan poc ventilada, no s'aconsegueix treure el flux de calor provinent del sostre, el què provoca que tingui temperatures relativament elevades.

Per altra banda, amb aquest mapa de temperatures a diferents alçades, veiem que aquestes en general són més altes a més alçada. Aquest fenomen -popularment obvi- es produeix perquè a una major temperatura, l'aire té menor densitat; per això l'aire calent està per sobre l'aire fred.

Finalment, hem extret un altre mapa de temperatures però de totes les parets (Figura 78). D'aquesta manera podem il·lustrar de forma més clara les conclusions que s'acaben d'esmentar.

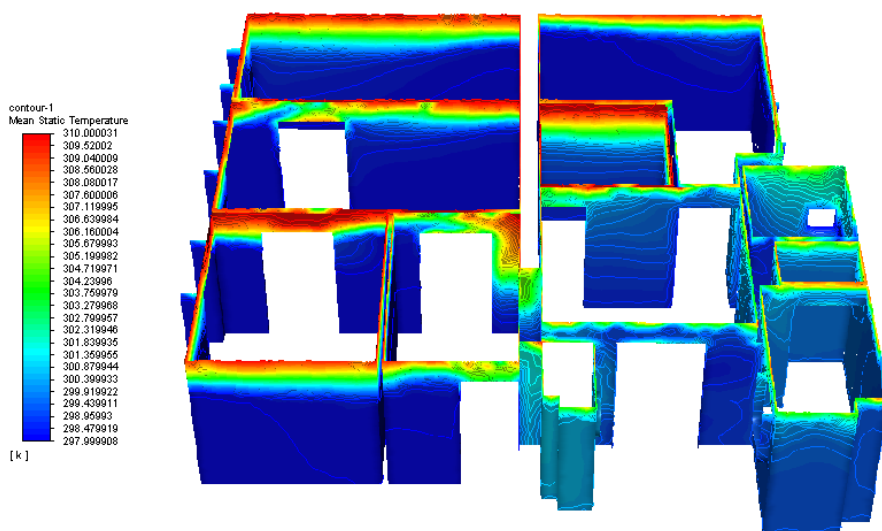


Figura 78: Mapa de temperatures de les parets.

4.2. Resultats de l'estudi de la malla

Un cop s'han realitzat totes les simulacions, cal comparar els diferents valors obtinguts depenent del tipus de malla. Aquests valors són: la temperatura i la velocitat mitjana de cadascuna de les finestres del pati interior i el flux de calor que travessa el terra. Són els mateixos que s'han definit a l'apartat 3.4.2.

A les següents figures es visualitzen tots els residuals durant les simulacions. Els residuals són petits errors entre el que s'ha calculat i el que s'esperava que sortís. En el nostre cas són el flux (*continuity*), les velocitats amb les tres components i l'energia. El càlcul es donarà per acabat en un d'aquests dos casos:

- Si tots els residuals són més petits que un cert valor definit prèviament –per exemple $1e-03$ –, es considerarà que la solució ha convergint i es donaran per bons els resultats calculats en l'última iteració.

- Si ja s'han realitzat un nombre elevat d'iteracions, s'aturarà la simulació i es consideraran vàlids els valors de l'últim càlcul.

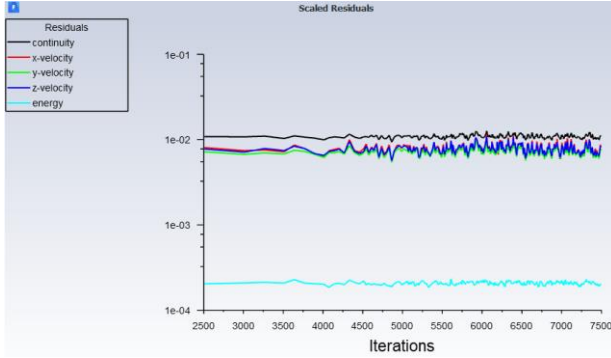


Figura 79: Residuals del primer cas.

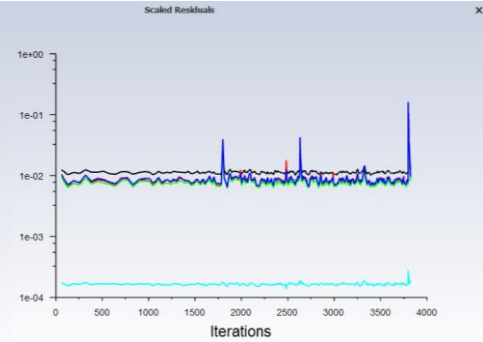


Figura 80: Residuals del segon cas.

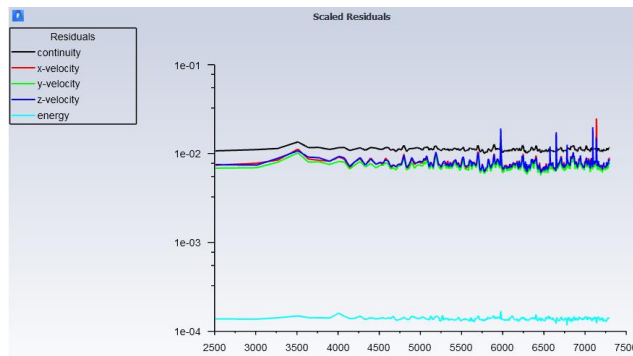


Figura 81: Residuals del tercer cas.

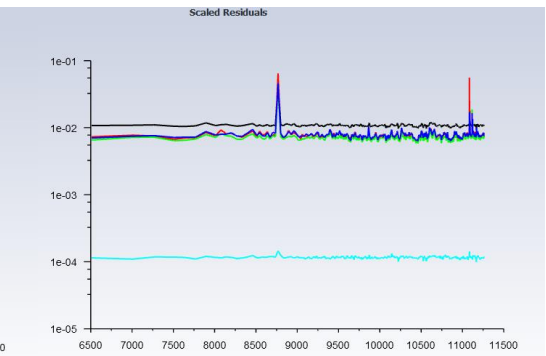


Figura 82: Residuals del quart cas.

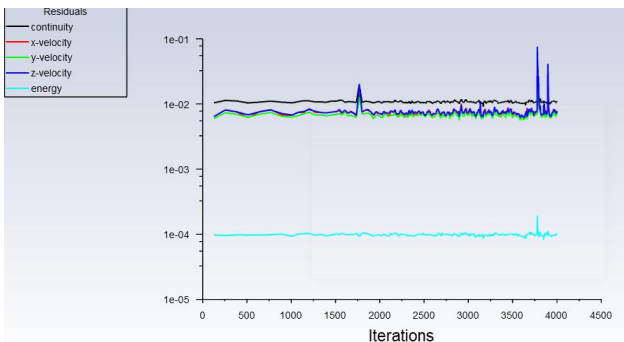


Figura 83: Residuals del quint cas.

Observem que els residuals van oscil·lant a mesura que es fan les iteracions, però en cap cas la solució arriba a convergir – arriben a un valor baix-. Tot i així, en efectuar-se tantes iteracions i observant que els residuals es mantenen més o manco estables, donarem per bons els resultats obtinguts.

Com ja hem esmentat, es farà una gràfica on diferents valors obtinguts estaran en funció de la densitat de malla. Recordem que la densitat de malla es calcula dividint el nombre d'elements entre el volum (veure Eq 3.3.1). El nombre d'elements dependrà de cada mallat, en canvi el volum és constant en tots els casos: aquest és de 234,024 m³.

A la següent taula (Figura 84) s'han dipositat els valors de temperatura, velocitat i flux de calor en diferents superfícies per cada mallat.

	size	20	17,50	15,00	12,50	10,00
Temperatura (K)	#elements	254865,00	378727,00	599486,00	1032156,00	2786141,00
	densitat	1089,05	1618,32	2561,64	4410,47	11905,36
	pati.l·lums.1	301,03	300,66	300,82	300,23	300,61
	pati.l·lums.2	299,75	299,65	299,75	299,54	299,70
	pati.l·lums.3	298,77	298,83	298,84	298,88	298,83
Velocitat (m/s)	pati.l·lums.1	0,99	1,03	0,98	0,98	1,05
	pati.l·lums.2	1,67	1,67	1,63	1,58	1,63
	pati.l·lums.3	2,12	2,17	2,14	2,15	2,08
Flux de calor (W/m ²)	terra	-0,16	-0,19	-0,22	-0,23	-0,27

Figura 84: Resultats de les simulacions.

Observem que la densitat creix exponencialment a mesura que disminuïm la mida de l'element. Per això, resulta interessant incorporar una línia de tendència logarítmica, ja que aquesta és útil quan la taxa de canvi augmenta o disminueix molt ràpidament.

S'han elaborat les següents gràfiques:

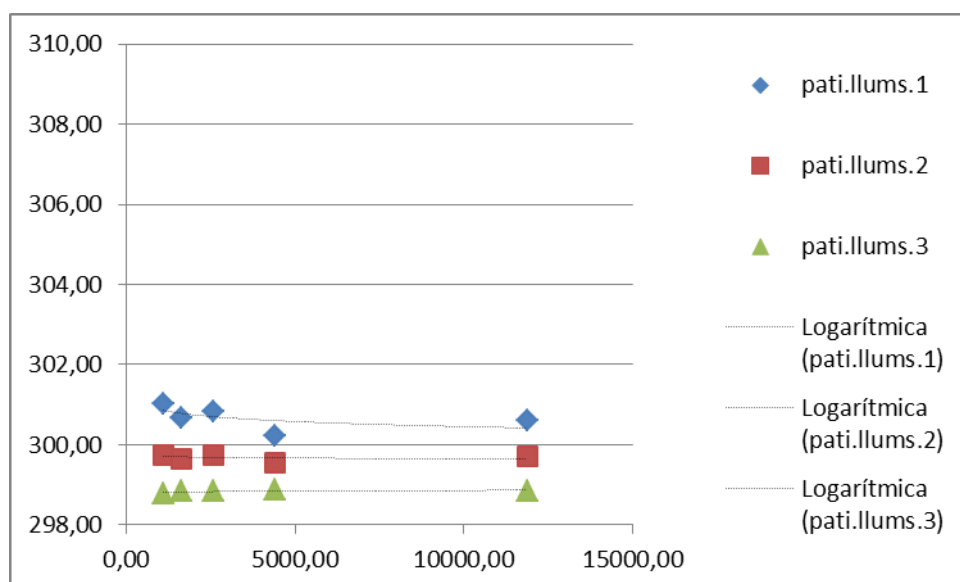


Figura 85: Temperatura a diferents superfícies en funció de la densitat de malla.

A la Figura 85 s'observa que en tots els casos (pati.llums1, pati.llums2 i pati.llums3) a partir del quart punt (size=12,5cm) s'estabilitza un valor. El comportament del pati.llums.1 és el més conflictiu, ja que el quart punt dista bastant de la línia de tendència. Tot i així, considerarem que en aquest punt s'ha produït una desviació temporal.

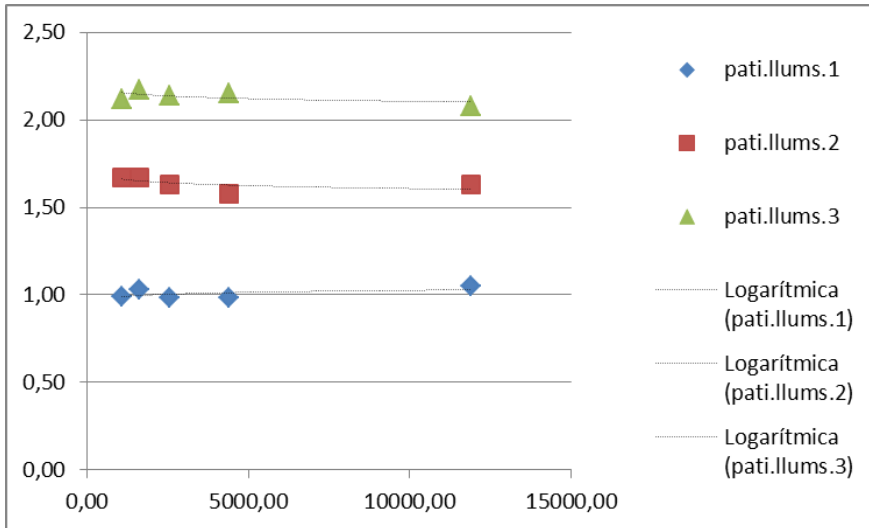


Figura 86: Velocitats a diferents superfícies en funció de la densitat de malla.

A la Figura 86 es podria dir que en tots els punts, hi tenim una temperatura pràcticament constant. Per tant, si només ens baséssim en aquests resultats donaríem com a mallat bo el més bast.

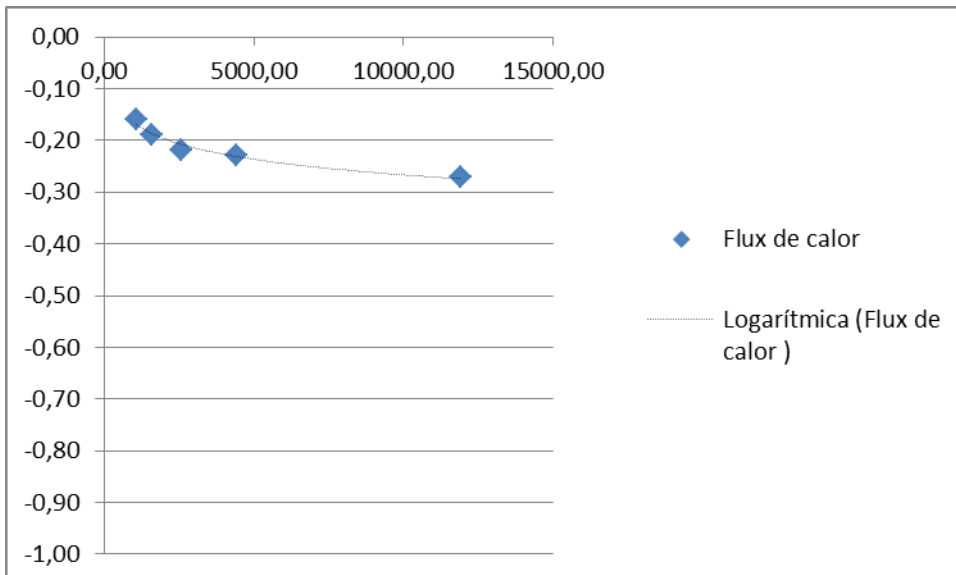


Figura 87: Flux de calor al terra en funció de la densitat de malla.

En aquesta última gràfica (Figura 87) observem que el valor del flux de calor disminueix molt ràpidament, i quan arriba al quart punt ho fa més suaument. No notem que en aquest punt s'hagi estabilitzat però el valor del flux varia molt poc respecte l'últim punt per la diferència de densitat que els separa.

Finalment, deduïm que a partir del 4 punt els resultats de les simulacions varien ben poc. D'aquesta manera anunciaríem que el mallat amb una mida d'element de 12,5cm per l'aire interior és el més òptim.

CONCLUSIONS

Eficiència energètica mitjançant CFD

No oblidem que el projecte forma part d'una col·laboració amb Oasiubrà per analitzar diferents estratègies d'intervenció per millorar l'eficiència energètica. El model funcional ha quedat completament definit perquè es realitzin aquests estudis. Personalment, volem reivindicar aquesta metodologia d'acció que permet estalviar recursos i trobar solucions molt eficients.

A causa de la manca de coneixement amb el software, he dedicat una gran quantitat d'hores per elaborar el model, així i tot, considero que ara mateix el podria fer en unes poques setmanes. Per tant, si es té un cert domini amb aquesta eina, pot resultar molt útil en el món de l'eficiència energètica.

En els pròxims anys, veurem com s'aplicaran lleis més restrictives per combatre la crisi climàtica. Una de les potes d'acció estarà implicada en l'ús de l'energia. Evidentment, s'ha de produir una transició que aposti per les energies renovables però complementàriament s'ha d'utilitzar la tecnologia per no malgastar tanta energia.

Actualment, respecte a l'eficiència energètica existeixen els certificats (CE) d'obligat compliment en cas de venda o lloguer si el comprador o llogater el requereix. Tot i així, la majoria de cases, no és que no tinguin una qualificació A o B, sinó que ni tan sols disposen d'ell. Segurament, el repte de combatre el canvi climàtic implicarà fer més rellevants aquests certificats. Per això mateix, s'hauran de fer grans intervencions als habitatges, i és aquí on la tecnologia -com simulacions energètiques mitjançant CFD- jugaran un paper important.

Per altra banda, des d'una perspectiva de confort tèrmic, aquestes eines poden servir per millorar les condicions de vida de les persones. De fet, aquest estudi fa palesa la potencialitat de la tecnologia per erradicar un problema de vulnerabilitat energètica.

Model final

La geometria i el mallat, a excepció de l'aire interior, ha quedat completament definit a l'Apartat 4.2 i 4.3, respectivament. Tot i així, s'ha hagut de fer un estudi de convergència de malla per l'aire interior, que és el que sol influenciar més sobre el comportament tèrmic i el moviment dels fluids, i per això s'ha fet una anàlisi alternativa. A l'apartat 4.4 s'ha explicat com s'han configurat les simulacions i a l'Aparat 5 el resultat de d'aquestes. A partir d'aquests resultats hem arribat a la conclusió que el mallat més eficient per l'aire interior és el d'una mida d'element de 12,5cm:

1. La Figura 85 , que avalua la temperatura de tres *outlets* en funció de la densitat de malla, ens aporta grans conclusions, ja que la temperatura s'estabilitza a partir el quart punt.
2. La Figura 86, que avalua la velocitat dels mateixos tres *outlets*, no ens aporta gran informació perquè el valor de la velocitat roman pràcticament constant.
3. La Figura 87, que avalua el flux de calor que surt pel terra, també hi troba un punt d'inflexió al tercer punt. No s'acaba d'estabilitzar allà però el valor no dista molt del valor final.

Per tant, concloem que el mallat més òptim és el d'una mida d'element de 12,5cm.

Per il·lustrar la solució completa, a continuació s'ensenya la configuració total de la malla:

- Aire exterior (b1, b2, b3): *Sizing* amb una mida d'element de 0,2m.
- Sostre: *Sizing* amb una mida d'element de 0,2m.
- Parets: *Sizing* amb una mida d'element de 0,1m i activada l'opció de detecció de proximitat amb 4 elements per cara.
- Aire interior (a1,...a11): *Sizing* amb una mida d'element de 0,125m

Els valors no mencionats serà els assignats per defecte.

Recomanacions per futurs treballs

Com ja hem comentat, l'estudi no finalitza amb l'obtenció del model de simulació sinó que requereix una continuació per realitzar anàlisis i avaluar estratègies d'intervenció. Però a més a més, l'associació està oberta a oferir més habitatges de l'edifici Sant Ramon 2 i fer servir la mateixa metodologia. Per tant, ens sembla francament interessant plasmar algunes recomanacions per futurs voluntaris que realitzin un model mitjançant ANSYS.

Primer de tot, cal establir una estratègia i una calendarització -entre quines setmanes es realitzarà la geometria, per exemple-. Cal conèixer tots els passos que seran necessaris per realitzar el treball. En segon lloc, aconsellaria fer unes setmanes de preparació. Això no tan sols ha de ser resoldre casos teòrics o tutorials d'ANSYS, sinó que es pot començar a plantejar un cas molt simplificat. És molt interessant realitzar aquest problema de dalt a baix: des de la geometria fins a les simulacions, i ordenar mentalment què s'ha de fer en cada pas. Sobretot saber quines eines es faran servir i quines operacions donaran més problemes.

Una altra cosa a contemplar és que cal evitar fer geometries molt complicades. Segurament, és la primera vegada que es resolen problemes fent servir el software, així que el domini és bastant limitat. Fer geometries molt complexes requereix tenir un gran coneixement en les eines de disseny del DesignModeler, sobretot eines de reparació.

En el present estudi, s'ha especificat al detall com s'ha construït la geometria: pas per pas i exposant les operacions més necessàries. També s'ha explicat com s'han de solucionar futurs problemes geomètrics. Evidentment aquesta estratègia és personal i cadascú en pot tenir una de diferent, però amb aquest projecte també es pretén establir un mètode eficaç de construcció de la geometria d'un pis. Cal insistir molt en elaborar una bona geometria, ja que si no és realitzada correctament, apareixeran futurs problemes que només es poden solucionar arreglant-la, és a dir, començant de nou. Per tant cal ser molt curosos en la seva construcció.

Respecte al maneig del software, s'ha de tenir en compte que es treballa amb arxius molt pesats, ja que els caos tenen un gran nombre d'elements. Així que cal ser molt precís quan s'estigui configurant el Setup, per exemple, perquè un petit error pot trigar molts minuts en calcular-se i, fins i tot, danyar l'arxiu. S'ha de ser molt pacient en cada operació i comprendre la gran quantitat de càlculs que es desenvolupen cada segon.

Finalment, m'agradaria donar molts ànims als futurs voluntaris d'Oasiurbà que s'endinsin a les simulacions amb CFD, perquè realitzar un model és un procés lent i feixuc però quan es comencen a veure resultats és molt gratificant.

COST I IMPACTE AMBIENTAL

Per fer la valoració econòmica del projecte, s'han dividit els costos en tres blocs: El cost de mà d'obra –enginyer/a que realitza el projecte- el cost de les eines –en el nostre cas el software de disseny i de càlcul- i el cost de computació.

El projecte es va inicialitzar dia 1 de setembre del 2019 i s'ha acabat dia 15 de gener del 2020. Llavors, han transcorregut 19 setmanes on s'ha repartit la feina de la següent manera: una primera fase d'aprenentatge de les eines que s'utilitzaran, una segona de recollida d'informació, una tercera de confecció de la geometria, una quarta d'elaboració de la malla, una quinta en què es van realitzar les simulacions i s'optimitzava o modificava el model i, finalment, la redacció de l'informe. Cada setmana s'ha treballat una mitjana de 20h que suposant un preu de 20€/h, surt un total de 7600€, que correspon al cost que suposa que treballi enginyer.

Els programes informàtics que s'han fet servir són: ANSYS i SolidWorks. El primer cost aproximadament 100000€ l'any i permet compartir-se a fins a 10 ordinadors. Així que, per un ordinador val 10000€ /any. El SolidWorks costa 9950€/any. D'acord amb la taula (Figura 88), s'han efectuat 160 hores d'ANSYS (100+60) –malla + simulacions i millores- i 80 hores de SolidWorks –elaboració de la geometria-. S'ha calculat el preu hora d'utilitzar cada software i s'ha trobat un cost total de 273,52€.

El cost de computació estàndard –basant-nos amb els preus del CESCA- és de 0,05€/h-processador. Si s'ha empleat 40h de computació en càlculs amb un ordinador que té 8 processadors, la despesa és de 16€.

La valoració total, sense costos d'administració, seria de 7889,52€. Si hi sumem els costos generals de gestió i administració –que hem suposat que corresponen a un 16,7% del projecte-, ens surt per 9471,21€. Per acabar, aplicant-hi un 21% d'IVA, arribem al preu final: 11988,87€.

A la Figura 121 es poden veure tots els càlculs aplicats:

Fases	nombre de setmanes	nombre d'hores	preu (€)	
Aprentatge	2,00	40,00	800,00	
Recollida d'informació	2,00	40,00	800,00	
Geometria	4,00	80,00	1600,00	
Malla	3,00	60,00	1200,00	
Simulacions i millores	5,00	100,00	2000,00	
Informe	3,00	60,00	1200,00	
Total	19,00	380,00	7600,00	

Eines				
Programes	preu/any	nombre d'hores	preu/hora	preu (€)
ANSYS	10000,00	160	1,141552511	182,65
SolidWorks	9950,00	80	1,135844749	90,87
Total	19950,00	240		273,52

Computació				
Tipus	hores	preu/hora·procesador	nº procesadors	preu (€)
Total	40,00	0,05	8,00	16

Cost total	
Cost abans adm	7889,52
Cost amb adm	9471,21
Cost amb IVA	11988,87

Figura 88: Costos del projecte.

El projecte també té un cert impacte ambiental, ja que s'han utilitzat tecnologies que consumeixen energia elèctrica. Per simplificar el càlcul s'ha emprat un factor de conversió que aproxima els g de CO₂ utilitzats per consumir un kWh. Segons l'Oficina Catalana del Canvi Climàtic, l'estima a 321g de CO₂ per kWh consumit [28].

Recordem que l'ordinador personal té una potència de 40W, en canvi l'ordinador computacional té 200W de potència. Multiplicades per les hores de treball i aplicant-hi el factor de conversió a Kg de CO₂ emesos, calculem que per realitzar aquest projecte s'han emès 7,4472Kg. Veure Figura 89.

	Potència (W)	hores	Consum (KWh)	Kg de CO ₂ eq
PC personal	40	380	15,2	4,8792
PC extern	200	40	8	2,568
Total	240	420	23,2	7,4472

Figura 89: Emissions de CO₂ per realitzar el treball.

AGRAÏMENTS

Per concloure, m'agradaria agrair a Alfredo Guardo Zabaleta per ajudar-me en tot moment a realitzar el treball. A estar sempre a disposició de resoldre tots els dubtes i problemes que anaven sorgint, i d'aquesta manera formar-me una mica més en l'ANSYS Fluent.

També voldria donar les gràcies a l'associació Oasiurbà per donar-me l'oportunitat de col·laborar amb el seu projecte i facilitar-me al màxim tota la informació requerida. M'agradaria reivindicar tota la feina que fan cada dia perquè es compleixi el dret a un habitatge digne, que és el pilar per poder millorar les condicions de vida del barri del Raval -i de qualsevol lloc-.

A l'associació Enginyeria Sense Fronteres, de la qual també hi formo part, per donar-me una visió complementària de l'enginyeria: una eina de transformació social al servei de les persones.

Finalment, agrair a totes les persones que m'estimen per l'ànim que m'han donat, i especialment als meus pares pel sacrifici econòmic i emocional que han fet durant més de quatre anys.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bouzarovski, S., Petrova, S. "A global perspective on domestic energy deprivation: Overcoming the energy poverty–fuel poverty binary. Energy Research & Social Science", 2015. Disponible a:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221462961500078X?via%3Dihub>
- [2] Tirado Herrero, S. "Indicadors municipals de pobresa energètica a la ciutat de Barcelona", RMIT Europe, RMIT University, Barcelona. 2018. Disponible a:
<https://habitatge.barcelona/sites/default/files/documents/indicadors-municipals-de-pobresa-energetica-a-la-ciutat-de-barcelona.pdf>
- [3] Agència de Saut Pública de Barcelona, "Enquesta de Salut Pública de Barcelona 2016/17", 2018. Disponible a:
<https://www.aspb.cat/wp-content/uploads/2018/07/Enquesta-salut-Barcelona-2016-17.pdf>
- [4] Àrea de drets Socials, Ajuntament de Barcelona, "Memòria 2017". Disponible a:
<https://ajuntament.barcelona.cat/dretssocials/sites/default/files/arxius-documents/memoria-area-drets-socials-2017.pdf>
- [5] Departament d'Estadística i Difusió de Dades, Ajuntament de Barcelona. Dades del barri del Raval (2017). Disponible a:
<https://www.bcn.cat/estadistica/castella/dades/inf/barris/a2017/barri1.pdf>
- [6] Institut d'Estadística de Catalunya, Generalitat de Catalunya. Dades sobre la Renta familiar disponible bruta territorial (2019). Disponible a: <https://www.idescat.cat/pub/?id=rdbc>
- [7] Universitat de Barcelona, "El Barrio del Raval de Barcelona (1999-2008)", 2009. Disponible a: <http://www.ub.edu/geocrit/b3w-824.htm>
- [8] Gaspar Maza, Gary McDouogh i Joan Josep Pujades, "Barcelona, ciutat oberta: transformacions urbanes, participació ciutadana i cultures de control al barri del Raval ", 2002. Disponible a <https://www.raco.cat/index.php/RevistaEtnologia/article/view/49123/57249>
- [9] Associació Oasiurbà, "Transformació Social des de l'habitatge". Document intern.
info@oasiurba.org

- [10] Fundación Gas Natural Fenosa, “Re-habilitación expres para hogares vulnerables: Soluciones a bajo coste”. Disponible a:
<http://www.fundacionnaturgy.org/ca/publicacion/rehabilitacio-expres-per-llars-vulnerables-solucions-baix-cost/>
- [11] Dades d'EnergyPlus. Disponible a: <https://energyplus.net/weather>
- [12] “Transferència de calor: Apunts de classe”, Prof Lluís Albert Bonals Muntada, 2018. Disponible a:
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/90176/9788495355898.pdf?sequence=6&isAllowed=y>
- [13] Reportatge de Promateriales, “Aislamiento Térmico: confort i ahorro energético. Disponible a: <https://promateriales.com/pdf/pm1904.pdf>
- [14] Yusuns A. Çengel, “Transferencia de calor y masa”, 2007. Disponible a:
https://www.u-cursos.cl/usuario/cfd91cf1d8924f74aa09d82a334726d1/mi_blog/r/Transferencia_de_Calor_y_Masa_-_Yunus_Cengel_-_Tercera_Edicion.pdf
- [15] John D. Anderson, Jr. “Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications”, 1995. Disponible a:
<https://soaneemrana.org/onewebmedia/COMPUTATIONAL%20FLUID%20DYNAMICS%20BY%20JHON%20D%20ANDERSON2%20JR..pdf>
- [16] Rafel Torres Parish, Proyecto Fin de Master, Comparación de Resultados de Análisis en CFD entre el módulo FloEFD de CATIA V5 y Fluent. Disponible a:
<http://biling.us.es/proyectos/abreproy/70931/fichero/TFM-MIA+Rafael+Torres+Parish.pdf>
- [17] Frank M. White, “Mecánica De Fluidos”, 2008.
- [18] Teory Guide. Disponible al Help d'ANSYS. Mitjançant llicència a:
https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v201/en/flu_th/flu_th.html
- [19] Presentación del Código Técnico de Edificación. Disponible a:
<https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-que-cte/menu-presentacion.html>
- [20] Documento Básico HE, Ahorro de energía. Disponible a:
<https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/ahorroEnergia/DBHE.pdf>
- [21] Documento de Apoyo al Documento Básico DB-HE Ahorro de energía. “Cálculo de

parámetros característicos de la envolvente”, Disponible a:

https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/ahorroEnergia/DA-DB-HE-1-Calculo_de_parametros_caracteristicos.pdf

[22] Documento Básico HS, Salubridad. Disponible a:

<https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/salubridad/DBHS.pdf>

[23] Diario Oficial de la Unión Europea, 19 de mayo de 2010. Disponible a:

<https://www.boe.es/doue/2010/153/L00013-00035.pdf>

[24] Boletín Oficial del Estado, Real Decreto 235/2013, 5 abril. Disponible a:

<https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2013-3904>

[25] Institut Català d'Energia, Generalitat de Catalunya, Usos de l'energia als edificis.

Disponible a: http://icaen.gencat.cat/ca/energia/usos_energia/edificis

[26] Ajuntament de Barcelona, Informació Urbanística. Disponible a:

<https://ajuntament.barcelona.cat/informaciourbanistica>

[27] Gerard Muñoz Estoquera, “Estudio CFD de la eficiencia térmica en una vivienda con riesgo de pobreza energética”, TFG, juny 2019.

[28] Oficina Catalana del Canvi Climàtic, “Nota informativa sobre la metodologia de estimación del mix eléctrico por parte de la Oficina Catalana del Cambio Climático”, febrero del 2019. Disponible a:

https://canviclimatic.gencat.cat/web/.content/04_ACTUA/Com_calcular_emissions_GEH/factors_emissio_associats_energia/190219_Nota-metodologica-mix_esp.pdf