

Treball de Final de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Estudi de la ventilació de les zones comuns d'un edifici del barri del Raval de Barcelona

MEMÒRIA

Autor: Gerard Xavier Civit Sentís
Director: Alfredo de Jesús Guardo Zabaleta
Convocatòria: Abril 2021



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

L'objectiu d'aquest projecte fer servir programaris de modelatge 3D i CFD - *Computational Fluid Dynamics* - per intentar solucionar un problema d'humitats a les zones comuns d'un edifici d'habitatges millorant-ne la ventilació.

L'edifici sobre el qual es fa l'estudi està situat al barri del Raval de Barcelona. S'ha treballat amb programari de modelat 3D per elaborar models de possibles reformes de l'escala de veïns i simular, amb programaris de CFD, quin efecte tindrien els canvis en la recirculació d'aire a les zones comuns.

A partir dels resultats de les simulacions, es realitza un anàlisi de les diferents actuacions proposades per decidir quina és la més òptima per contribuir a solucionar els problemes de ventilació i humitats.

El projecte s'ha desenvolupat en el marc de la col·laboració del professor Alfredo Guardo Zabaleta amb l'entitat Oasiurbà. Aquesta entitat sense ànim de lucre treballa per millorar les condicions de vida del veïnat – principalment del barri del Raval de Barcelona – i col·labora a garantir el dret a un habitatge digne.

Sumari

SUMARI	4
1.1. Origen del projecte.....	7
1.2. Motivació.....	7
1.3. Requeriments previs.....	8
2. INTRODUCCIÓ	9
2.1. Objectius del projecte	9
2.2. Abast del projecte	9
3. MARC TEÒRIC	10
3.1. Les humitats per capil·laritat	10
3.1.1. La capil·laritat.....	11
3.1.2. Les humitats a l'edificació	13
3.2. Transferència de massa	14
3.2.1. Transferència per difusió.....	14
3.2.2. Transferència per convecció	15
3.3. Dinàmica de fluids computacional	16
3.3.1. El pre-processament.....	16
3.3.2. Simulació	17
3.3.3. Post processament	17
4. METODOLOGIA	18
4.1. Cas d'estudi	18
4.1.1. L'edifici.....	18
4.1.2. Zones a estudi	19
4.2. El modelat.....	20
4.2.1. La geometria.....	20
4.2.2. SolidWorks.....	24
4.2.3. Design Modeler.....	27
4.3. El mallat	29
4.3.1. Contactes.....	29
4.3.2. <i>Named Selections</i>	31
4.3.3. Tipus de malla.....	33
4.3.3.1. Aire interior i aire del pati de llums.....	33
4.3.3.2. Aire de l'atmosfera	34
4.3.3.3. Refinaments	35
4.4. Fluent.....	37

4.4.1. Entrades i sortides	37
4.4.2. <i>Interfaces</i> i parets.....	40
4.4.3. Propietats tèrmiques i materials	41
4.4.4. Simulacions.....	43
4.4.5. Post processament	45
5. RESULTATS	46
5.1. Valors obtinguts.....	46
5.1.1. Cas sense obertures a les portes ni efectes tèrmics (1NT).....	47
5.1.2. Cas amb obertures i sense efectes tèrmics (2NT)	49
5.1.3. Cas sense obertures i amb efectes tèrmics d'estiu (1TE)	51
5.1.4. Cas amb obertures i efectes tèrmics d'estiu (2TE).....	53
5.1.5. Cas sense obertures i amb efectes tèrmics d'hivern (1TH).....	55
5.1.6. Cas amb obertures i efectes tèrmics d'hivern (2TH)	57
5.2. Comparativa de resultats.....	58
CONCLUSIONS	63
PLANIFICACIÓ DEL PROJECTE	66
COST DEL PROJECTE	66
IMPACTE AMBIENTAL	68
AGRAÏMENTS	69
BIBLIOGRAFIA	70
Referències bibliogràfiques.....	70
Bibliografia complementària.....	71

Prefaci

1.1. Origen del projecte

He realitzat aquest projecte a l'últim any dels meus estudis de Grau en Enginyeria en Tecnologia Industrials. Des del 2017 soc soci d'Oasiurbà, una entitat sense ànim de lucre que treballa per a millorar les condicions de vida del veïnat del barri del Raval de Barcelona, principalment de les que viuen en situacions més precàries.

A partir d'aquesta afiliació, vaig conèixer la col·laboració que duu a terme amb l'entitat el professor Alfredo Guardo, que de seguida vaig trobar interessant i vaig demanar-li de realitzar el meu treball de final de grau en el marc d'aquesta col·laboració. Va ser aleshores quan ell em va exposar el cas de Sant Ramon nº2 i els problemes existents. El projecte em va despertar el meu interès.

1.2. Motivació

Durant els últims anys he pogut conèixer, aprendre i observar sobre el terreny els coneixements i eines que actualment existeixen per desenvolupar projectes d'enginyeria en els diferents on tenen atribucions o estan presents els enginyers industrials. Al mateix temps he constatat que aquestes eines poques vegades es posen en pràctica per a contribuir a que aquella gent que viu en condicions indignes deixi de fer-ho.

Cap ciutat hauria de permetre que la falta de recursos – ja siguin econòmics o socials – impedis a ningú l'accés a un habitatge digne i estable. Cada setmana hi ha gent desnonada a Barcelona. No obstant, tot i no tenir la mateixa visibilitat, hi ha molta gent que no tenen un desnonament pendent però viu en condicions molt precàries per deixadesa voluntària de la propietat o de l'administració – en aquest últim cas, potser per saturació. Considero que existeix la necessitat d'utilitzar tots els recursos existents per resoldre una situació d'injustícia social creixent.

Estudiant el Grau en Enginyeria en Tecnologies industrials, he gaudit molt aprenent a utilitzar els programes de simulació d'ANSYS a les assignatures de Mecànica dels Medis Continus, Resistència de Materials i Mecànica de Fluids. Considero que un bon coneixement de programaris de simulació de fenòmens físics i l'ús d'aquests en bessons digitals - o, com està més de moda, *digital twins* - de productes o estructures és una eina pràcticament indispensable per a un enginyer que comença ara la seva carrera professional.

Quan l'Alfredo em va explicar els projectes que es duïen a terme en el marc de la seva col·laboració amb Oasiurbà, vaig entendre que allà és on havia de fer el TFG, ja que combinava els interessos, inquietuds i aprenentatges que he explicat als paràgrafs anteriors.

1.3. Requeriments previs

El professor Alfredo Guardo em va demanar que prèviament a l'inici de la meva col·laboració amb el projecte, aprofundís i/o recordés els meus coneixements sobre el funcionament dels programaris que hauria d'utilitzar: SolidWorks, l'entorn Ansys WorkBench i, principalment, Fluent.

Per fer-ho, vaig repassar manuals de programaris, realitzar alguns mòduls de cursos de plataformes de cursos online i visualitzar alguns vídeo tutorials en línia. Les referències (i enllaços si són recursos web) a aquests recursos es poden trobar a la bibliografia addicional.

2. Introducció

2.1. Objectius del projecte

L'objectiu general del projecte és el de ajudar a definir - en col·laboració de l'equip d'arquitectes d'Oasiurbà - com ha de ser la reforma de les zones comunes de l'edifici del número 2 del carrer Sant Ramon.

En principi, només es contemplen canvis a la coberta del badalot de l'escala de veïns i a aquelles portes d'ús comunitari – la de la façana principal que dona al carrer Sant Ramon i la del badalot que dona accés al terrat.

El que es persegueix amb aquest estudi és determinar quina és la geometria més òptima per millorar la ventilació de l'escala per a què se solucionin els problemes d'humitats que ara mateix existeixen.

2.2. Abast del projecte

A nivell més específic i tècnic, el treball pretén abastar els següents punts:

- Traslladar les geometries acordades amb els arquitectes a un model geomètric 3D mitjançant un programari de disseny assistit per ordinador (CAD).
- Importar el model al software de simulació (ANSYS Fluent) i definir el mallat adient per la geometria.
- Definir les condicions de contorn i realitzar les simulacions dels diferents casos proposats.
- Incorporar, si és possible, les condicions tèrmiques per poder veure els efectes de la convecció natural – a més de la forçada pels canvis a la geometria.
- Realitzar un anàlisi comparatiu dels resultats i cost-benefici de les diferents actuacions.

3. Marc teòric

3.1. Les humitats per capil·laritat

Una de les patologies més freqüents del que solen patir edificis antics i/o en estat precari de conservació són les humitats. Aquestes poden tenir diverses causes, principalment la condensació de l'aigua present a l'ambient a l'interior de l'estància o, com el cas que ens preocupa, la capil·laritat.

Antigament els camins eren permeables i els murs eren els elements més resistents del carrer. Avui en dia és habitual que els carrers siguin asfaltats i els paviments continus. El carrer Sant Ramon no n'és una excepció (veure Il·lustració 1).



Il·lustració 1. El carrer Sant Ramon a l'alçada de l'edifici a estudi.

Segons dades publicades a la web de l'Ajuntament de Barcelona [1], el barri del Raval és dels llocs amb un nivell freàtic - o distància del terreny a les capes freàtiques - més petit de la ciutat. Això fa que molts edificis construïts durant la urbanització del barri, entre finals del segle XIX i principis del segle X, tinguin els fonaments directament en contacte amb aquestes capes.

En el cas d'un edifici, si els fonaments estan directament en contacte amb capes freàtiques del sòl l'aigua troba l'única sortida en l'element que menys resistència presenta i passa a omplir porus, fissures o juntes entre peces del mur, que actuen com a *tubs capil·lars* (veure 3.1.1), ascendint l'aigua a través d'ells. Aquesta humitat acaba generant taques a parts del mur que es troben a l'ombra i/o mal ventilats, degut a que no es pot transferir la massa d'aigua per convecció (veure apartat 143.2) ni es pot evaporar per l'escalfament del sol.

3.1.1. La capil·laritat

En vocabulari de construcció arquitectònica, es defineix la capil·laritat com la qualitat d'un material o element constructiu, amb porositat oberta, que en posar-se en contacte amb un líquid en provoca una succió, el qual passa a omplir, en major o menor grau, els porus del sòlid [2].

Amb caràcter més general, la capil·laritat és un efecte que es pot produir quan es submergeix un tub – o alguna cosa en forma de tub – en un líquid que és capaç de *mullar* les seves parets. Si, a més, el diàmetre del tub és suficientment petit, això acaba provocant l'ascensió de l'aigua que queda dins seu. A continuació s'explica en més detall els fenòmens físics que provoquen aquest comportament.

La tensió superficial

Es la resistència que presenta un líquid a submergir un sòlid en ell, o la quantitat d'energia que cal per augmentar la seva superfície per una unitat d'àrea. Es una manifestació de les forces intermoleculares al líquid en qüestió.

La pressió capil·lar

Es la pressió, o diferencial de pressions, entre dos fluids immiscibles en el context del fenomen la capil·laritat, a dins del *tub capil·lar*. La tensió superficial provocada per aquesta fa que una superfície es contragui fins a ocupar la mínima àrea possible. En el nostre cas l'aigua líquida es contrau per l'efecte de l'aire, com quan una sola gota d'aigua adopta una forma esfèrica.

Angle de contacte

La relació entre les forces de cohesió (les forces d'atracció intermoleculares d'un líquid) i les d'adhesió (forces d'atracció entre el líquid i la paret). Aquesta relació determina l'angle de contacte entre un líquid i un sòlid, que a la vegada determinen la capacitat d'un líquid de mullar, o no, una superfície d'un sòlid.



Il·lustració 2. Exemples de diferents meniscs de contacte entre líquid i superfície. Imatge extreta de la referència [3].

A la Il·lustració 2 es pot veure les dues opcions com poden ser aquests contactes. Si l'angle és inferior a 90° i el menisc (el contacte entre líquid i superfície) és còncav, és perquè l'adhesió

es superior a la cohesió, i diem que el líquid MULLA el sòlid. Si l'angle és obtús i formen un menisc convex, la cohesió és superior a l'adhesió i per tant, el líquid NO MULLA el sòlid.

L'exemple clàssic de diferents angles de contacte de líquids amb el mateix sòlid és el de l'aigua i el mercuri en superfícies de vidre (veure Il·lustració 3).

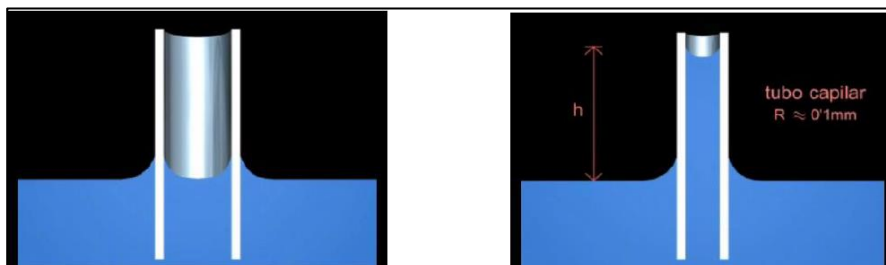


Il·lustració 3. Gotes de mercuri i aigua tenyida de vermell sobre vidre. Font: Fine Art America.

Tubs capil·lars

Els fenòmens anteriorment descrits fan que, quan es submergeix un tub o un sòlid amb forma de tub, pugui aparèixer la capil·laritat.

Si es submergeix un sòlid mullable en el líquid formant un tub de radi suficientment petit, els meniscs còncavs que es formaran en els contactes del líquid amb les parets del tub es posen en contacte i s'uneixen.



Il·lustració 4. Tub normal (esquerra) i tub capil·lar (dreta)

A la Il·lustració 4 es pot observar la corba que apareix. Aquesta, aproximadament esfèrica, genera una pressió capil·lar negativa o depressió que fa que el líquid ascendeixi fins que el pes de la columna de fluid compensa aquesta depressió. Aquest fenomen apareix en tubs molt petits, de radi inferior o igual a 0.1mm, del que es deriva el seu nom de *tubs capil·lars*, per la similitud de la seva secció gruix amb el d'un cabell.

3.1.2. Les humitats a l'edificació

L'aparició d'humitats és una de les patologies més comuns als nostres edificis. Poden aparèixer en cobertes, finestres, tancaments, parets o sostres. Poden arribar a provocar danys permanents a l'estructura, en el pitjor dels casos, si no se'ls hi posa remei.

De la mateixa manera, aquestes patologies i l'ambient excessivament humit que es genera a les estances on apareixen poden ser causants de problemes de salut a la gent que hi viu o treballa. A un article publicat l'any 1986 i que actualment es pot trobar a l'arxiu de la *U.S. National Institutes of Health's National Library of Medicine* [4] ja s'exposa com una excessiva humitat relativa en ambients tancats pot fer augmentar la incidència de infeccions respiratòries i al·lèrgies.

Actualment es poden trobar moltes empreses especialitzades en la detecció i tractament d'humitats en general i de les provocades per capil·laritat en particular. Les solucions que solen aportar aquestes acostumen a ser prou costoses i requereixen de revisions i manteniments periòdics. Exemples d'aquestes són:

- Injeccions de resina o gel per garantir la estanquitat respecta a la humitat ascensional.
- Drenatges perimetrals.
- Electroosmosi.

La manera més bàsica de combatre i prevenir la formació d'humitats - sobretot les provocades per condensació i/o capil·laritat - és millorar, quan és possible, la ventilació de l'estança on han aparegut. Aquesta és la finalitat principal d'aquest projecte, ja que les condicions socioeconòmiques i dels habitants altres característiques de l'edifici en estudi en dificulta qualsevol altra.

A l'apartat següent, 3.2, s'expliquen els fenòmens físics que permeten combatre les humitats a les parets mitjançant la millora de la ventilació de l'espai.

3.2. Transferència de massa

Com assegura el físic Yunus A. Çengel al seu llibre *Transferència de calor y masa: Un enfoque practico* [5], transferència de massa és el moviment d'espècies químiques entre dues regions de composicions – i potser inclús fases – diferents. Aquest moviment l'impulsa la diferència de concentració de l'espècie a les regions, des de la que té una concentració major a la que té una concentració menor.

Cengel, al llibre, exposa també que la transferència de massa presenta moltes analogies amb la transferència de calor, produïda per una diferència de temperatura, en canvi d'una de concentracions. Així doncs, els mecanismes de transferència de massa són molt semblants als de conducció i convecció de calor – que s'estudien a l'assignatura de Termodinàmica, a l'últim curs del GETI (Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials). Fins al moment no se sap de cap mecanisme anàleg a la radiació tèrmica en transferència de massa.

A continuació s'exposen i s'explica el funcionament bàsic dels diferents mecanismes de transferència de massa.

3.2.1. Transferència per difusió

Un dels mecanismes de transferència de calor és la conducció. El flux de calor transferit per conducció en una regió determinada en una direcció x determinada és proporcional al gradient de temperatura dT/dx i s'expressa per la **Llei de Fourier**:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx}$$

Equació 1. Llei de Fourier. Flux calorífic transferit per conducció.

On k és la conductivitat tèrmica del medi i A és la secció normal a la direcció de transferència de calor.

Similarment, el flux màssic transferit per difusió – mecanisme anàleg a la conducció tèrmica – és proporcional al gradient de concentració de l'espècie química al medi dC/dx i s'expressa per la **Llei de Fick**:

$$\dot{m}_{dif} = -D_{AB}A \frac{dC_A}{dx}$$

Equació 2. Llei de Fick. Flux màssic transferit per difusió.

On D_{AB} és el coeficient de difusió de l'espècie al medi.

3.2.2. Transferència per convecció

El mecanisme de transferència de massa per convecció entre una superfície i un fluid es basa en els mateixos principis que la convecció de calor. És una combinació de dos fenòmens: la difusió de massa (o la conducció en el cas de la calor) i el moviment de tota la massa del fluid. El moviment allunya el fluid amb una concentració més alta – o el fluid a una major temperatura en la convecció de calor – de la primera capa de contacte amb la superfície i el substitueix per un fluid amb concentració menor – o una menor temperatura.

El flux màssic transferit per convecció d'una superfície a un fluid es pot expressar mitjançant la següent expressió:

$$\dot{m}_{conv} = h_{massa} A_s (\rho_{A,s} - \rho_{\infty})$$

Equació 3. Transferència de massa per convecció

on h_{massa} és el coeficient mitjà de transferència de massa per convecció, A_s és l'àrea de la superfície de convecció, $\rho_{A,s}$ és la densitat de l'espècie a la superfície (a la banda del fluid) i ρ_{∞} la densitat de l'espècie en el flux lliure de fluid.

El coeficient de convecció

La convecció tant de massa com de calor és complicada de definir per la complexitat associada als fluxos de fluids. No obstant, és raonable afirmar que en regions amb una velocitat superior – i per tant més moviment – de fluid el coeficient de convecció h_{massa} (h_{conv} en el cas de calor) serà més gran i, per tant, es produirà una major transferència per convecció.

Com explica Çengel al seu llibre, hi ha dos fenòmens que provoquen el moviment d'aire i, per tant, la convecció de massa o de temperatura en aquest fluid:

- **La convecció forçada** és aquella que s'esdevé d'un moviment de fluid (aire) provocat per efectes mecànics d'una font externa que produeix un gradient de pressions que alhora provoca el flux de fluid de pressions altes a baixes.
- **La convecció natural** s'esdevé d'un moviment de fluid provocat per un gradient de densitats del fluid associada a un gradient de temperatura del propi fluid.

La manera, doncs, d'aconseguir treure l'aigua que produeix les humitats de les parets d'un edifici és la mateixa que la que utilitzem per assecar més ràpidament qualsevol cosa: augmentar la velocitat de l'aire que l'envolta per augmentar la transferència per convecció de massa d'aigua de la superfície (paret) al fluid (aire).

3.3. Dinàmica de fluids computacional

Les sigles CFD fan referència, en anglès, a *Computational Fluid Dynamics*, una branca de la mecànica de fluids que fa servir mètodes numèrics (elements finits, volums finits, etc.) per analitzar i solucionar problemes complexos d'enginyeria, per calcular tot allò relacionat amb els fluids. L'ús d'ordinadors i de programaris que implementen aquests càlculs fan possible estudiar en un temps molt inferior al de fa anys fluxos de fluids en geometries i amb condicions complexes.

La posada en pràctica del CFD consta habitualment de 3 etapes diferenciades.

3.3.1. El pre-processament

Consisteix en traslladar tota la informació ja coneguda del món real al virtual i definint com es partirà la geometria en volums finits que es faran servir per realitzar els càlculs mitjançant mètodes numèrics. A continuació s'explica més en detall cadascuna de les seves subetapes:

- S'elabora el model de la geometria utilitzant un software de disseny CAD.
- Es realitza el mallat del model, és a dir la definició de regions més petites en les que es divideix la geometria per a l'aplicació dels mètodes numèrics per resoldre les equacions. Aquestes formen una malla que pot ser estructurada o no i uniforme o no.
- Es defineixen les propietats físiques de que se suposen, o se saben en detall, de l'objecte d'estudi, principalment el material del que estan fets i les seves propietats
- Es defineixen les condicions de contorn del cas d'estudi – temperatures, pressions, velocitat i densitat dels fluids, etc.

3.3.2. Simulació

S'utilitzen mètodes numèrics per a resoldre les equacions que governen el sistema i es resolen de manera iterativa fins que els resultats de les incògnites de les mateixes convergeixin o oscil·lin dins d'un marge que es consideri acceptable – a criteri de la persona que les executi, segons el cas d'estudi.

En el cas concret d'aquest treball, el programari utilitzat ha estat l'ANSYS Fluent que utilitza el mètode dels volums finits per a la resolució de les equacions, que s'acostuma a utilitzar a programaris comercials de CFD.

Aquest mètode consisteix a dividir la geometria en volums molt petits per a poder després assumir que les derivades respecte a coordenades espacials són en realitat increments. Així doncs això permet transformar les principals equacions que governen el comportament dels fluids de la seva forma diferencial a la seva forma integral per a cada volum de control.

Algunes de les equacions que es resoldran als càlculs de les simulacions dels casos que ocupen aquest estudi són les de Navier-Stokes, que són parcials de segon ordre i serveixen per resoldre gran part dels problemes amb fluids viscosos. Alguns exemples són:

- De conservació de la massa
- De conservació del moviment cinètic
- La conservació de l'energia.

3.3.3. Post processament

Un cop obtinguts els resultats, cal visualitzar-los. És important generar gràfics i altres visualitzacions de dades i comparacions de resultats que aportin valor per l'anàlisi del cas d'estudi. A la guia d'usuari de Fluent trobem instruccions detallades de tot el catàleg de visualitzacions i gràfics possibles.

4. Metodologia

4.1. Cas d'estudi

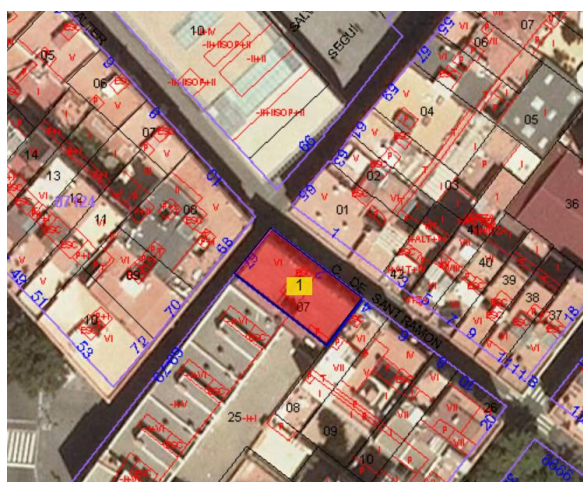
4.1.1. L'edifici

L'edifici que s'estudia en aquest projecte està situat a la cantonada del carrer Sant Ramon amb el carrer Sant Pau del barri del Raval de Barcelona. La porta d'entrada es troba al nº2 del carrer Sant Ramon, a la façana principal de l'edifici que està orientada cap al nord-est.



Il·lustració 5. Imatge de la façana principal de l'edifici. Font: Cadastre [6].

Segons la fitxa del Cadastre [6], l'edifici data de l'any 1900 i la parcel·la que ocupa - amb referència cadastral 0712707DF3801B - té una superfície de 248 metres quadrats.



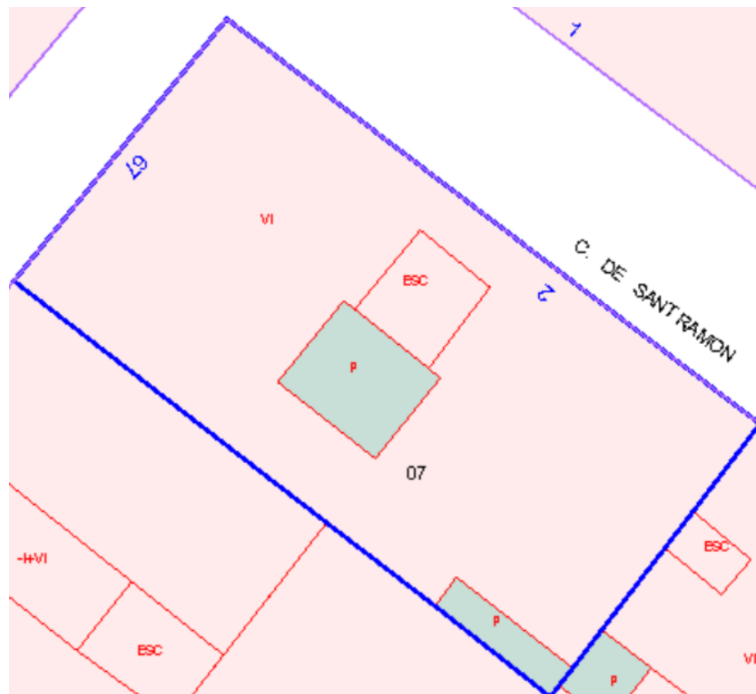
Il·lustració 6. Ubicació de la parcel·la on està l'edifici. Font: Cadastre [6].

És un edifici de 5 plantes. La planta baixa està destinada a diferents locals comercials destinats a la venda i reparació de telèfons mòbils, tot i que es conserva el marc de l'aparador i el cartell d'una antiga farmàcia que ocupava pràcticament la totalitat d'aquesta planta. La resta de l'edifici són apartaments d'ús residencial.

Hi ha dues façanes, la del carrer Sant Ramon i la del carrer Sant Pau, i dues parets mitgeres, oposades a cadascuna de les façanes.

4.1.2. Zones a estudi

Tal com es pot veure a la Il·lustració 7, al mig de la planta es troben l'obertura corresponent a l'únic pati de llums que hi ha – indicat amb una P – i la coberta de l'escala de veïns – indicada amb les lletres ESC.



Il·lustració 7. Planta simplificada del terrat de l'edifici. Font: Cadastre [6].

L'escala de veïns, inclosos el replà de cada planta i el badalot (la caixa que sobresurt per sobre de l'escala i dona accés al terrat) configuren les zones comunes de l'edifici. Els fluxos de l'aire que circula dins d'aquestes zones són els que es volen estudiar en aquest projecte.

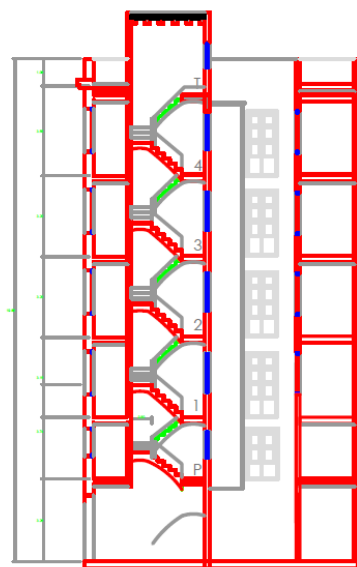
Al model realitzat també hi ha el pati de llums o pati interior, ja que a través del mateix hi circula part de l'aire de l'atmosfera que entra o surt de les zones comunes, a través d'unes finestres que el connecten amb l'escala de veïns.

4.2. El modelat

4.2.1. La geometria

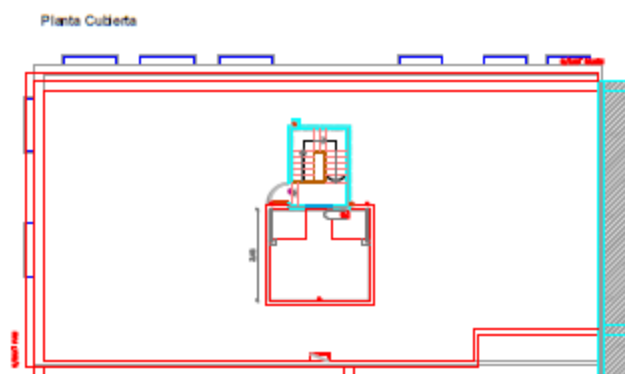
L'equip d'arquitectes d'Oasiurbà s'ha encarregat de dibuixar amb AutoCAD els plànols en 2D de tot l'edifici, com a part del projecte de reforma.

A les il·lustracions Il·lustració 8 i Il·lustració 9 es mostren les diferents vistes elaborades per l'equip d'arquitectes de l'estat actual de l'edifici.



Sección Transversal. EA

Il·lustració 8. AutoCAD. Secció transversal de l'estat actual de l'edifici.

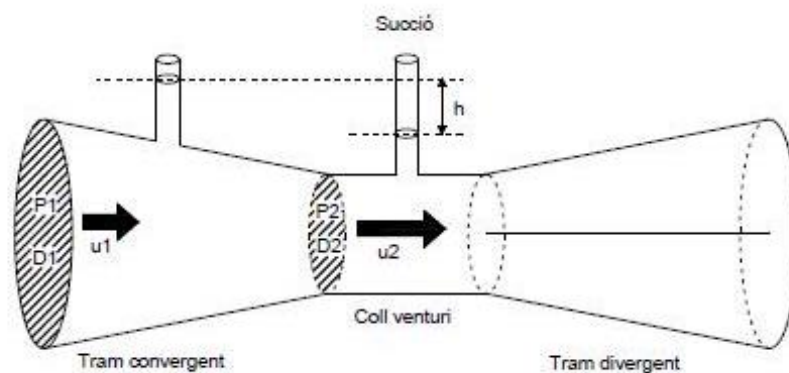


Il·lustració 9. AutoCAD .Planta del terrat i la coberta (transparentada) de l'estat actual de l'edifici.

En reunions entre l'equip d'arquitectes d'Oasiurbà es va definir que les úniques actuacions possibles eren canvis en la coberta del badalot (la que cobreix l'escala de veïns) i a les portes del terrat i del carrer. Cal recordar que l'actuació a estudi en aquest projecte és només una part dins d'un projecte de reforma de tot l'edifici i existeixen, a més, limitacions pressupostàries.

Un cop definides les àrees d'actuació, es va procedir a debatre amb els arquitectes quines haurien de ser les actuacions i com convindria que fos la geometria dels nous elements.

La principal idea que va sortir d'aquestes reunions va ser la de modificar la coberta del badalot per un amb una geometria similar a una tovera on s'hi produeix l'efecte de Venturi [7].



Il·lustració 10. Tub on es produeix efecte Venturi. Font: EPSEM (UPC) [7] 0

La reducció de secció fa augmentar la velocitat del vent que incideix (ja que el caudal no disminueix). Això genera una caiguda de pressió que provoca una depressió i, aleshores una succió de fluid al punt de mínima secció.

La idea seria accelerar el vent que passa just per sobre un forat que hi hauria a la coberta del badalot i la succió es generaria de dins l'escala cap a la obertura de la coberta, provocant una convecció forçada (veure apartat 3.2.2) a l'interior de l'escala de veïns.

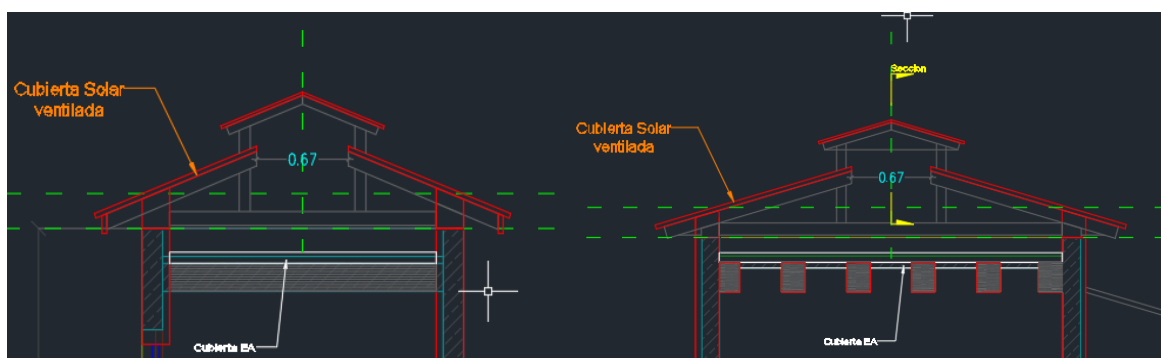
Segons dades del Servei Meteorològic de Catalunya (veure **Error! No s'ha trobat l'origen de la referència.**), a la zona hi predomina vent procedent del sud oest a unes velocitats d'entre 0.5 i 5 m/s.

Al disseny que es pot veure a la Il·lustració 11 es pot veure la coberta amb forma similar a un tovera de Venturi. La obertura més gran de la vista lateral estaria orientada al sud oest i la coberta elevada sobre uns pilars.



Il·lustració 11. Alçat (esquerra) i vista lateral (dreta) d'una iteració de disseny de la coberta.

A la Il·lustració 12 es pot veure un disseny que no inclou la coberta elevada que imita una tovera, però sí que incorpora un nou element, al que es fa referència com a *Cubierta solar*. La idea darrere aquest disseny és que la part de la coberta assenyalada s'escalfi amb la irradiació solar (l'edifici està a Barcelona) i alhora escalfi l'aire de la part més superior de l'escala de veïns, afavorint la convecció natural (veure apartat 3.2.2).

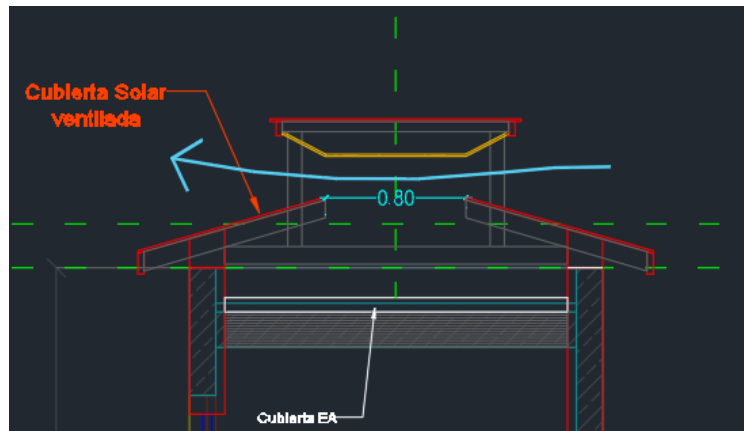


Il·lustració 12. Alçat (esquerra) i vista lateral (dreta) d'una iteració de disseny de la coberta.

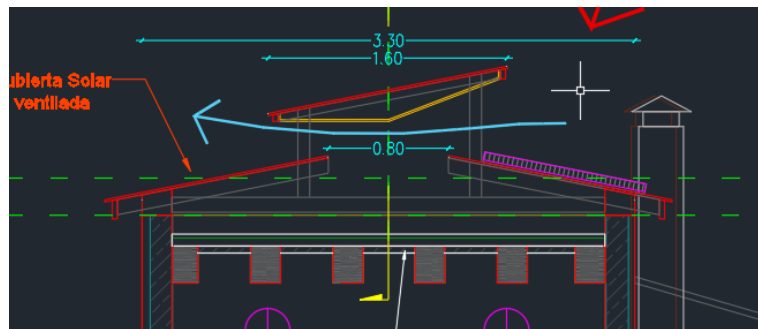
Després de varies iteracions del disseny com les que es poden veure a les figures anteriors, s'arriba a un disseny definitiu que satisfà a les 2 parts, arquitectes i enginyers.

La geometria de la coberta que finalment ha estat simulada és la que es pot veure a les il·lustracions Il·lustració 13 i Il·lustració 14. Aquesta combina els dos dissenys de les il·lustracions Il·lustració 11 i Il·lustració 12 per a poder combinar els efectes mecànics i tèrmics i afavorir tant la convecció natural com forçada.

Se simplifica una mica el disseny, sobretot de la coberta elevada que imita un tovera, per simplificar-ne la seva construcció.



Il·lustració 13. Alçat de la coberta de la geometria simulada.



Il·lustració 14. Vista lateral de la coberta de la geometria simulada.

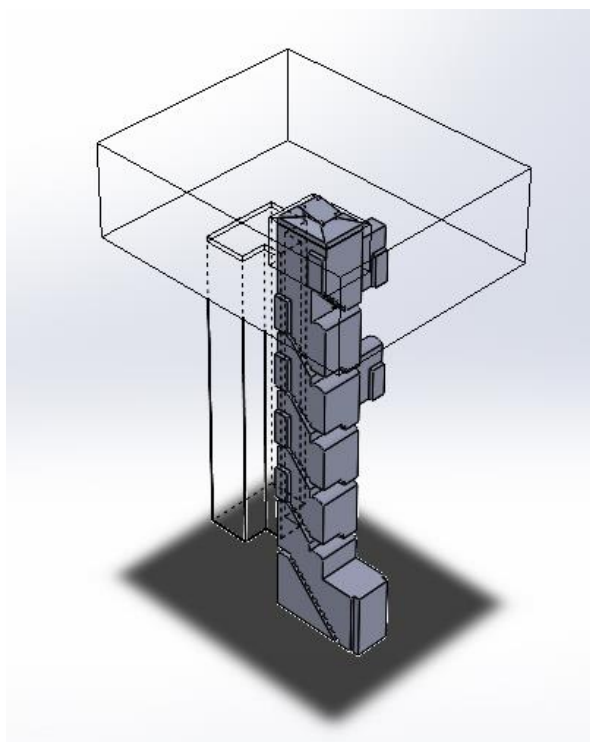
4.2.2. SolidWorks

Amb els plànols 2D realitzats pels arquitectes de l'edifici i del nou disseny de la coberta s'ha elaborat el model 3D en SolidWorks (programari de modelat assistit per ordinador).

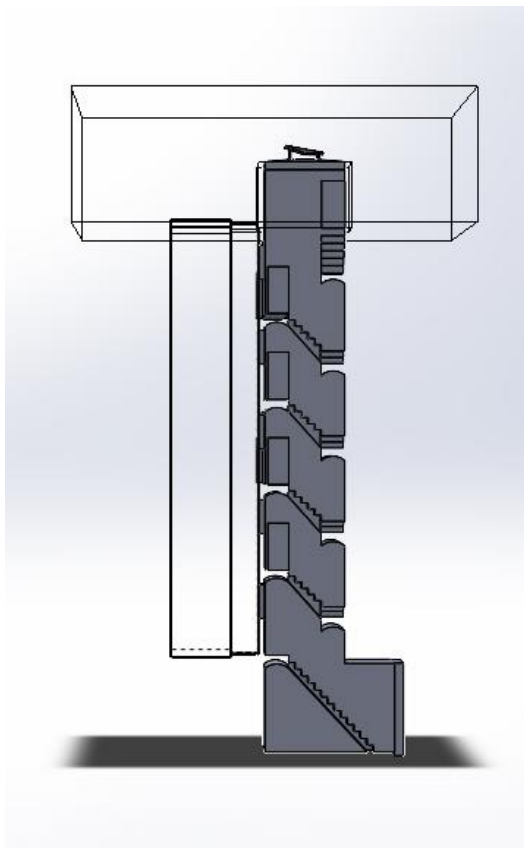
Només s'han modelat les parts que feien falta per les simulacions que ocupen aquest projecte: l'interior de l'escala de veïns (inclosos els replans de cada pis, les portes d'accés als pisos i al carrer i les finestres que donen al pati interior), el badalot amb la seva coberta i la porta que dona accés al terrat i el pati interior.

També s'ha creat un volum en forma de capsa (prisma rectangular) amb la base al pla on hi ha el terrat de l'edifici i una alçada i llargària arbitràries però suficientment grans per a què simuli la part de l'atmosfera que està en contacte amb l'edifici. Les cares laterals d'aquest prisma seran entrades (la que està enfocada a sud oest) i sortides d'aire.

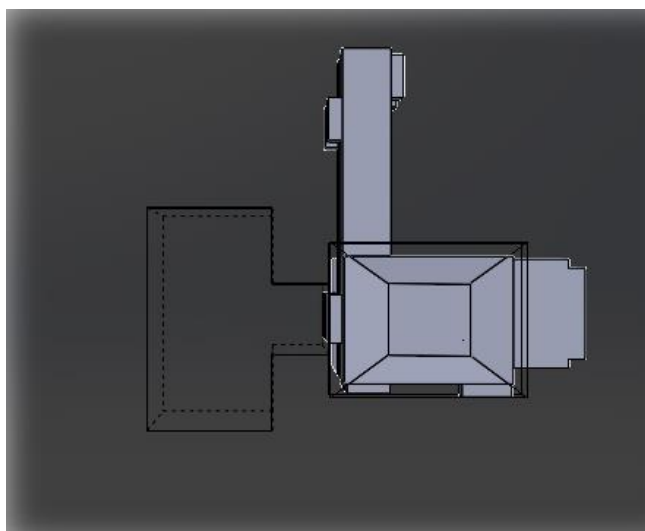
Cal remarcar que una part important d'aquest model ja va ser realitzat pel Luis Gamez [9] en el seu treball de final de grau. A continuació es mostren diferents vistes de com ha quedat el model amb la nova geometria de la coberta.



Il·lustració 15. Vista isomètrica del model sencer.



Il·lustració 16. Vista lateral del model sencer.



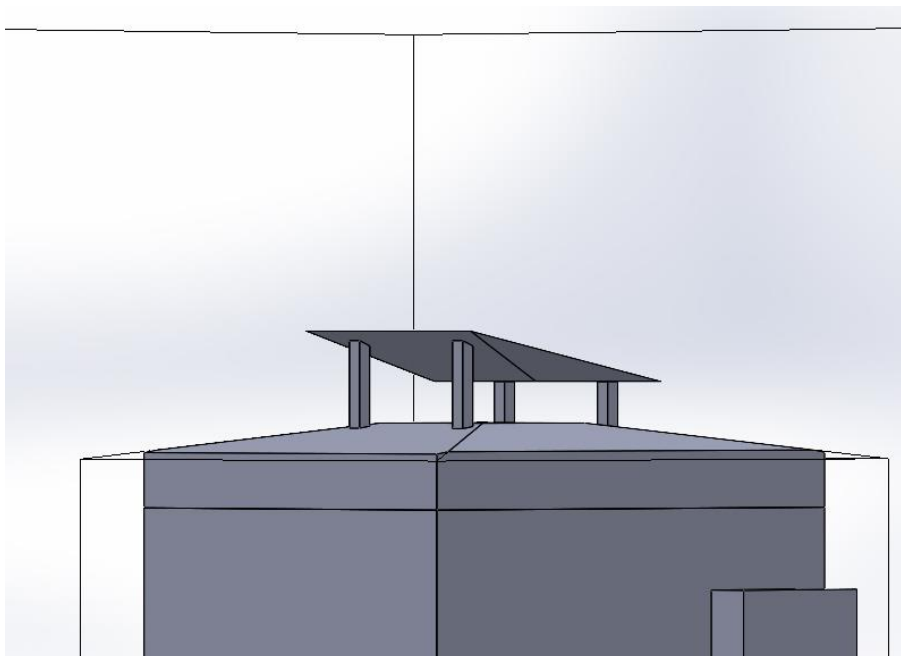
Il·lustració 17. Vista superior del model.

A les il·lustracions Il·lustració 15, Il·lustració 16 i Il·lustració 17 es poden veure els 3 cossos definits als Solidworks, corresponents als 3 volums d'aire que estudiarem a les nostres simulacions:

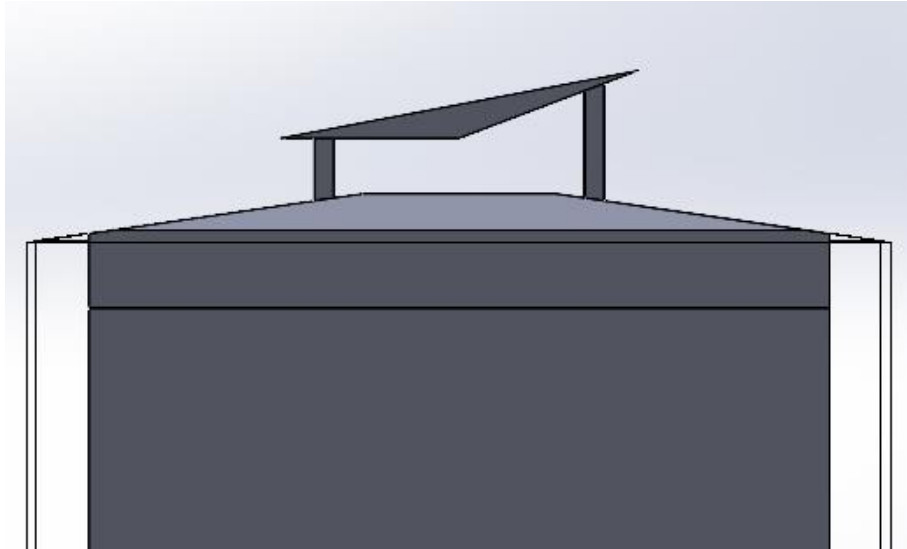
- L'aire de l'atmosfera per sobre el terrat (només es poden veure les arestes de les seves cares)
- L'aire del pati de llums (es veuen les arestes).
- L'aire interior a l'escala de veïns (les seves cares en color gris)

El disseny que s'ha acabat definint implica una geometria de la coberta d'una certa complexitat. A l'hora de traslladar aquesta geometria a SolidWorks s'han hagut de fer una sèrie de simplificacions de la mateixa.

Principalment s'ha simplificat la geometria del volum que queda elevat a la coberta per a treure al màxim possible parts que no tinguessin efectes mecànics sobre el flux de vent. Es pot comparar les il·lustracions Il·lustració 19 i Il·lustració 19 amb les Il·lustració 14 i 15 per veure les simplificacions). Com més simple és el model menys possibles errors a les simulacions i menys temps de càlcul. Cal dir que el model ja és prou complex a l'interior de l'escala de veïns.



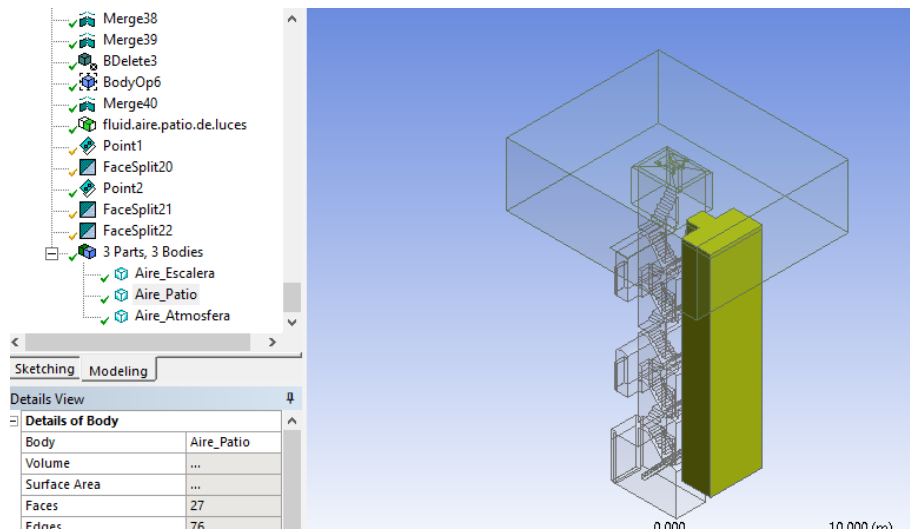
Il·lustració 18. Detall de la coberta del model.



Il·lustració 19. Vista lateral del model. Detall de la coberta.

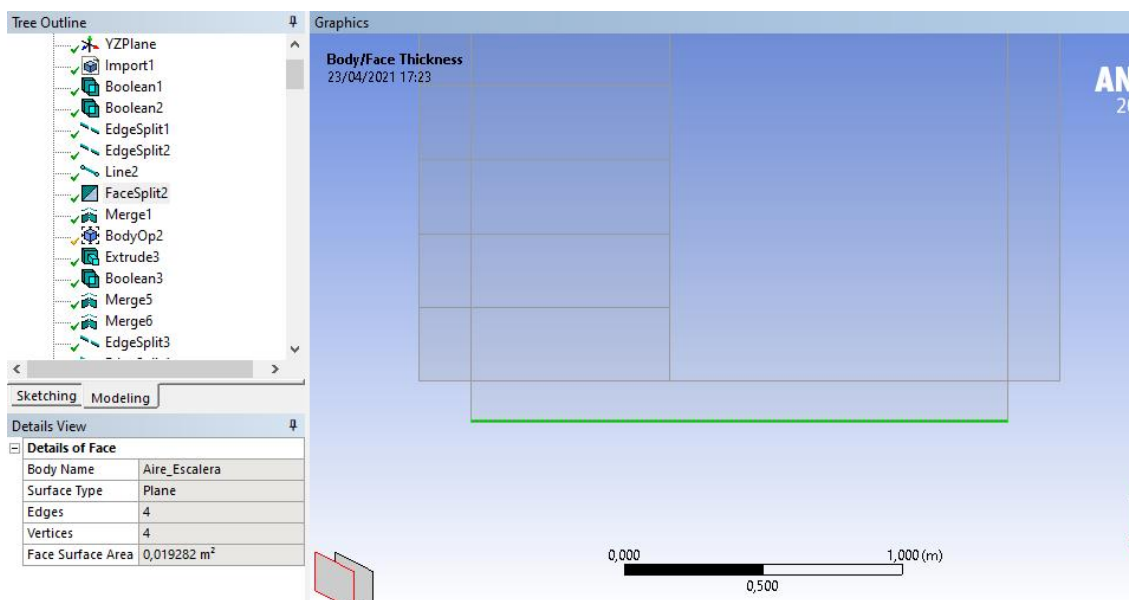
4.2.3. Design Modeler

Un cop elaborat el model 3D en SolidWorks s'ha importat l'arxiu a un projecte d'ANSYS Workbench. S'ha utilitzat posteriorment el programa Design Modeler, del propi entorn ANSYS Workbench, per acabar de retocar el model i combinar les diferents parts per formar cada cos de fluid i els noms d'aquests per tal de facilitar l'execució de la simulació.



Il·lustració 20. Vista dels 3 cossos de fluid del model a Design Modeler.

S'han creat unes petites particions (d'1 cm) a la part inferior de totes les superfícies de portes i finestres de l'escala de veïns, imitant les ranures que existeixen a la realitat a qualsevol porta i finestra. A la Il·lustració 21 es pot veure.



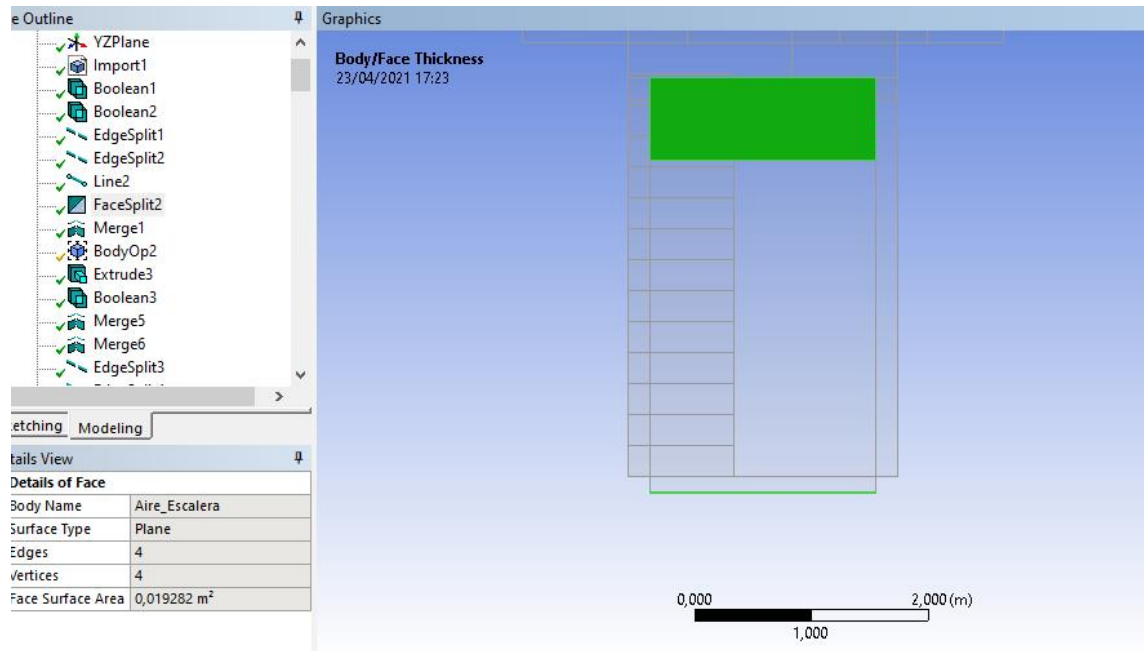
Il·lustració 21. Vista frontal del model a Design Modeler. Detall de la porta principal, amb la partició creada i destacada a la part inferior.

És en aquesta etapa quan s'ha dividit el que fins aleshores era un únic model en 2 amb una mínima diferència de disseny - que possiblement comportarà una diferència de resultats important.

D'acord amb l'equip d'arquitectes, s'ha decidit simular una geometria amb obertures a les portes d'accés al carrer (a la façana) i al terrat (al badalot) amb la finalitat de millorar el moviment de l'aire interior a l'escala de veïns.

Per a crear aquesta variació del model, només ha calgut realitzar afegir particions a les superfícies corresponents a les portes del badalot i la façana.

S'han situat les obertures a la part superior de les portes, ocupant un 20% de la seva superfície. A la Il·lustració 22 es pot veure com ha quedat la de la porta principal.



II-lustració 22. Vista frontal del model a Design Modeler. Detall de la porta de la façana amb les particions corresponents a la ranura i l'obertura destacades.

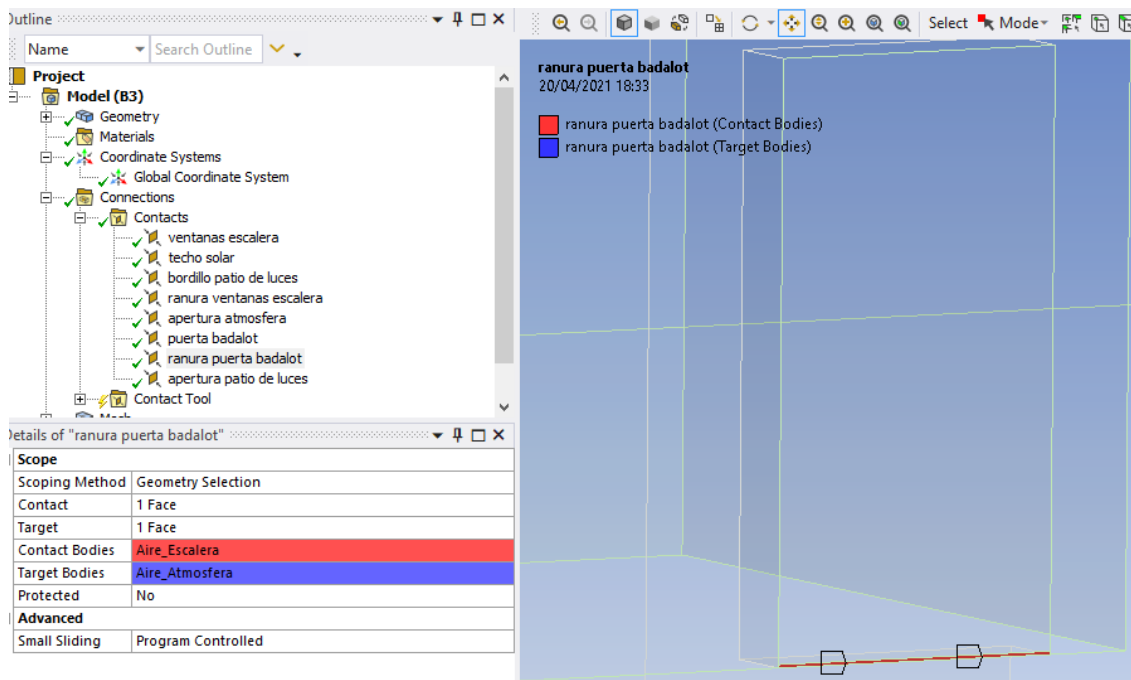
D'ara en endavant, anomenarem **Model 1** al que no té aquestes particions o obertures i **Model 2** al que sí les té.

4.3. El mallat

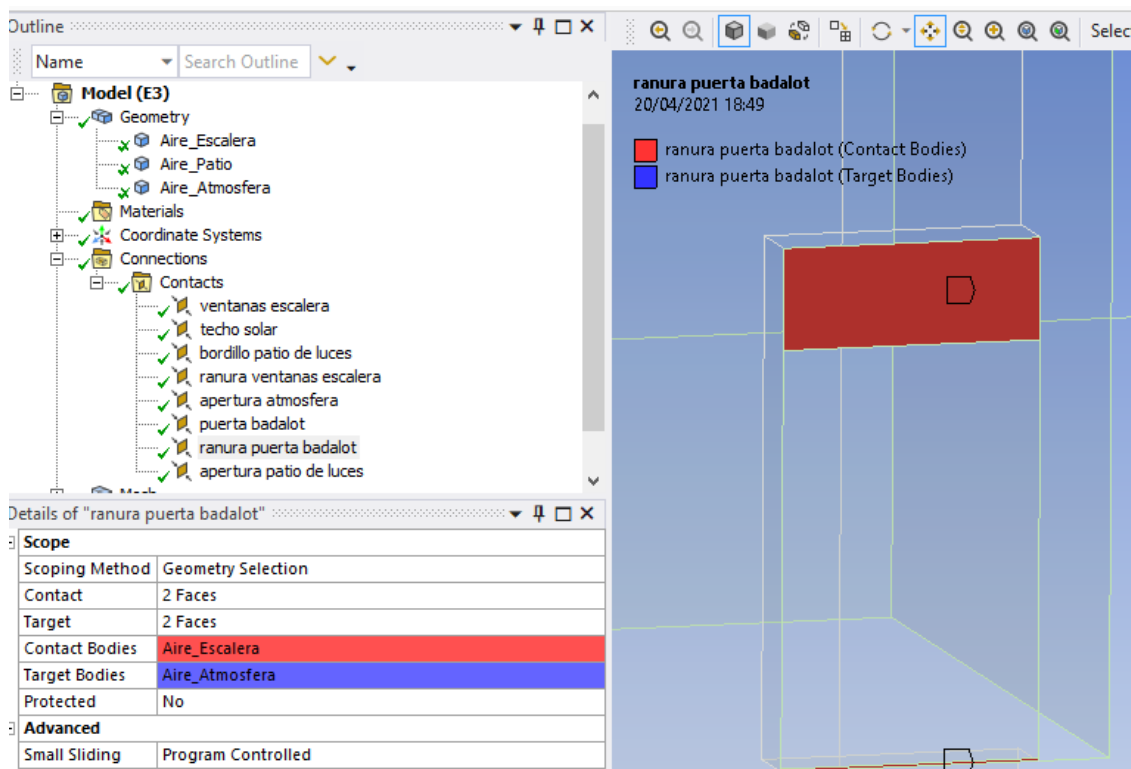
Un cop ben definida les geometries a simular dins del projecte de Workbench, s'ha utilitzat l'eina Meshing del Workbench per definir-ne el mallat. Prèviament a definir el tipus de malla són necessàries dues operacions: la definició dels contactes entre els cossos del model i anomenar específicament zones a les que posteriorment (a la configuració de les simulacions) se li hauran de donar unes condicions de contorn específiques.

4.3.1. Contactes

A l'eina de mallat d'ANYS s'han definit els contactes entre regions (o cossos) del modelat. Aquests contactes són exactament els mateixos pels 2 models, amb la diferència que el contacte "ranura puerta badalot" inclou la obertura superior present a la port d'accés al terrat al **Model 2**, com es pot veure a les il·lustracions II-lustració 23 i II-lustració 24.



Il·lustració 23. Mallat del model 1. Definició del contacte entre aire interior i aire atmosfera de la ranura de la porta del badalot.



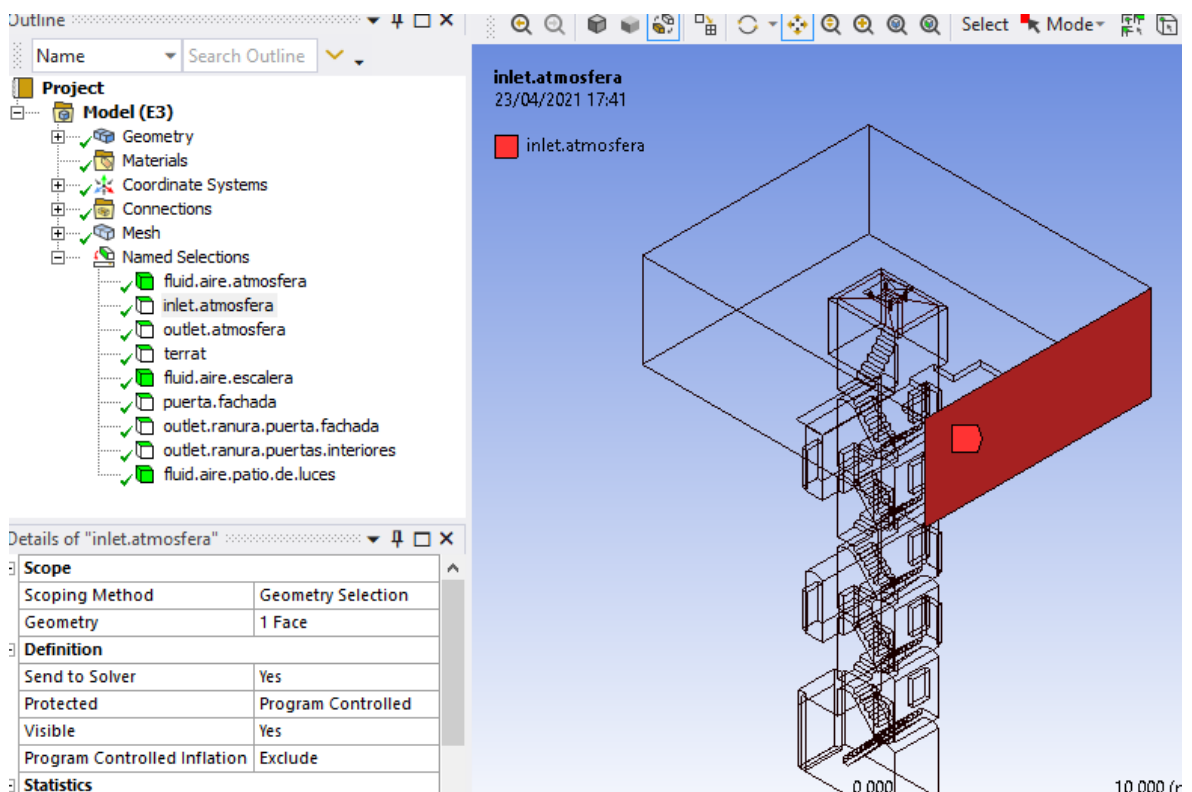
Il·lustració 24. Mallat del model 2. Definició del contacte entre aire atmosfera i interior de la ranura i obertura de la porta del badalot.

4.3.2. *Named Selections*

Seguidament a la definició de contactes, s'ha procedit a anomenar específicament aquelles parts dels cossos a les que més tard – al preparar la simulació – se li donaran atorgaran unes propietats o condicions de contorn especials. Això s'ha realitzat utilitzant l'eina *Named Selections*.

El nom que se li donen a aquestes seleccions és important per facilitar la feina de més endavant, a l'hora de configurar les simulacions. El Fluent detecta quin nom se li han posat i ens els configura automàticament dins de l'apartat correcte a les condicions de contorn.

Es classifiquen les seleccions com a paret sòlida (*wall*), entrada (*inlet*), sortida (*outlet*) o fluid (*fluid*). A les següent figura (Il·lustració 25) veiem com han quedat aquestes seleccions.



Il·lustració 25. Mallat casos sense efectes tèrmics.. *Named Selections*.

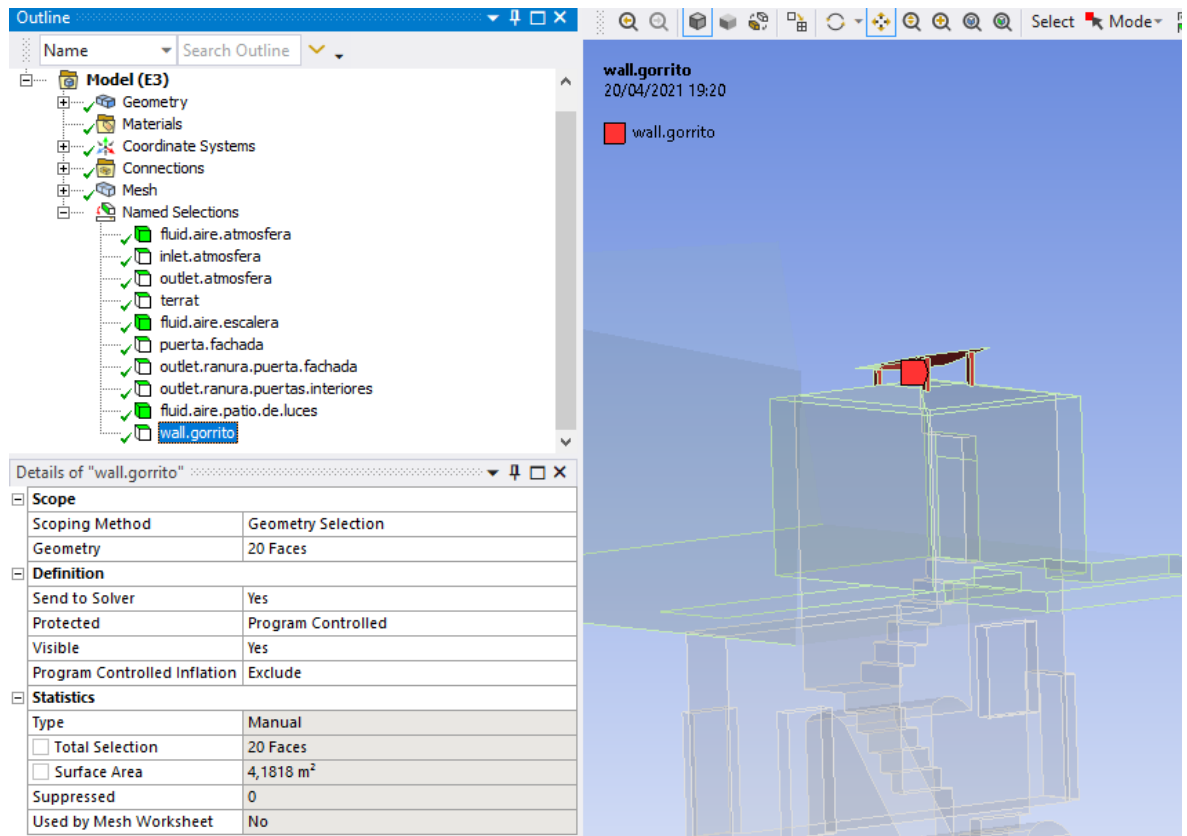
Els noms són iguals pels 2 models, amb l'única diferència que la selecció outlet.ranura.puerta.fachada inclou la obertura superior al model 2. A l'annex es poden trobar les 2 figures (**Error! No s'ha trobat l'origen de la referència.** i **Error! No s'ha trobat l'origen de la referència.**) que destaquen aquesta diferència.

En aquesta etapa del procés també es van tornar a desdoblar el número de casos. Després d'obtenir els primers resultats, es va decidir que també se simularia el comportament de les geometries incorporant l'efecte de la temperatura ambient i la irradiació solar als fluxos de ventilació – aquesta decisió s'explicarà en profunditat més endavant, a l'apartat 5.1.2.

Això va provocar que calgués afegir una nova selecció, corresponent a la part de la coberta que queda elevada, a la que durant l'elaboració amb l'equip d'arquitectes ens hi referíem com a "gorrito".

El motiu pel qual ha estat necessari definir específicament aquest element per les simulacions tèrmiques és el fet d'haver d'assignar-li un material concret, diferent a la resta de l'estructura.

A les simulacions no tèrmiques s'ha considerat negligible l'efecte de tenir diferents materials a cada element sòlid del nostre model. A continuació es mostra com han quedat les *Named Selections* per les simulacions amb efectes tèrmics (Il·lustració 26).



Il·lustració 26. Mallat casos amb efectes tèrmics. Named Selections.

4.3.3. Tipus de malla

Un cop definits els diferents cossos, els contactes i les *named selections* s'ha passat a establir el tipus de mallat adient per a cada part del model. Bàsicament les diferències els trobem al les dimensions dels elements o *sizing* de cada malla, ja que s'ha deixat que s'ha utilitzat la opció *Automatic Method* de l'eina de mallat. Aquesta opció assigna automàticament la forma dels elements (tetraedres, hexaedres, etc.) com consideri convenient el programa, segons la geometria del cos a mallar.

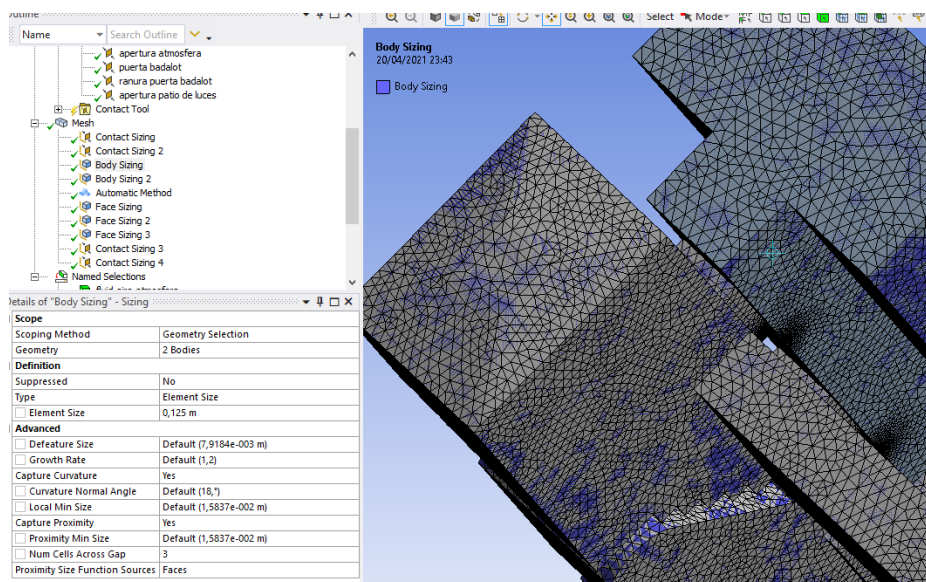
En aquest apartat no hi ha cap diferència destacable entre cadascuna de les geometries ni simulacions, així que bàsicament quin tipus de malla (bàsicament quin *sizing*) s'ha establert per a cada cos.

4.3.3.1. Aire interior i aire del pati de llums

Els dos cossos als que més atenció es va posar en la seva malla són els corresponents als volums de fluid (aire) que circula per dins de l'escala de veïns i el pati de llums. Els resultats

de velocitats, fluxos i pressions de l'aire en aquestes zones són importants pel projecte.

Per definir el *sizing* s'ha recuperat la feina feta pel Borja Olivés al seu projecte **Error! No s'ha trobat l'origen de la referència.**, al que es defineix que la mida òptima dels elements per aquest tipus de cossos – aires interiors a analitzar en detall – és de 0,125m.

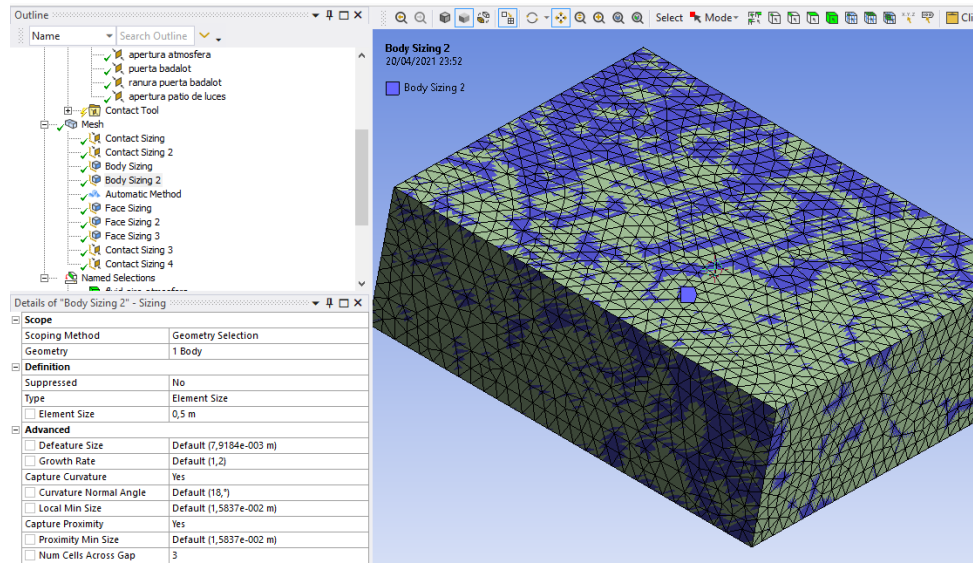


Il·lustració 27. Malla de l'aire interior i del pati de llums.

4.3.3.2. Aire de l'atmosfera

Aquest cos és un volum d'aire amb forma de prisma rectangular la base del qual correspon al terrat. La resta de cares del qual serveixen com a entrades (la que està orientada al sud oest) i sortides d'aire de l'atmosfera.

La seva utilitat serà, bàsicament, fer entrar el vent i deixar sortir aire del nostre model. Així doncs, no és de molt interès els resultats dins seu i els elements de la malla poden ser més grans que la resta. S'ha establert, doncs, un *element size* de 0,5m.

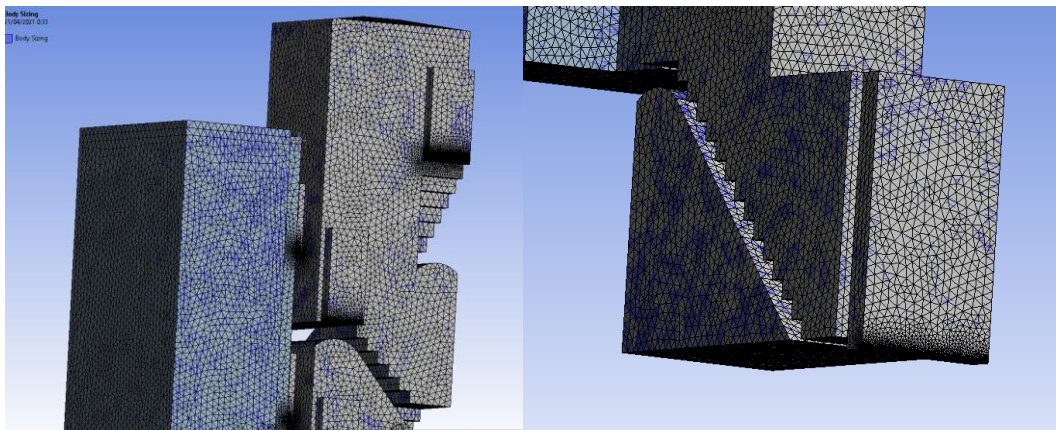


Il·lustració 28. Mallat de l'aire de l'atmosfera.

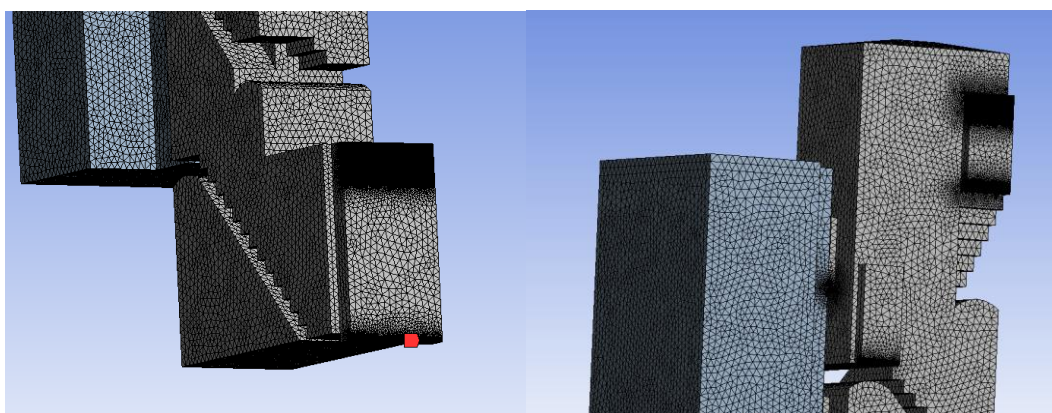
4.3.3.3. Refinaments

Algunes regions del model tenen particularitats d'anàlisi o són especialment sensibles a possibles errors. En aquestes s'ha realitzat el que es coneix com un refinat de la malla, s'hi consistent en assignar una mida de l'element més petita – d'aquí refinar ja que la malla es fa més "fina". A continuació s'especifica com han estat aquests refinaments segons les regions.

A totes les ranures de portes i finestres s'ha establert una mida d'element de 0,01m, a les figures següents es pot veure com a mesura que ens hi apropem la malla es fa més densa.

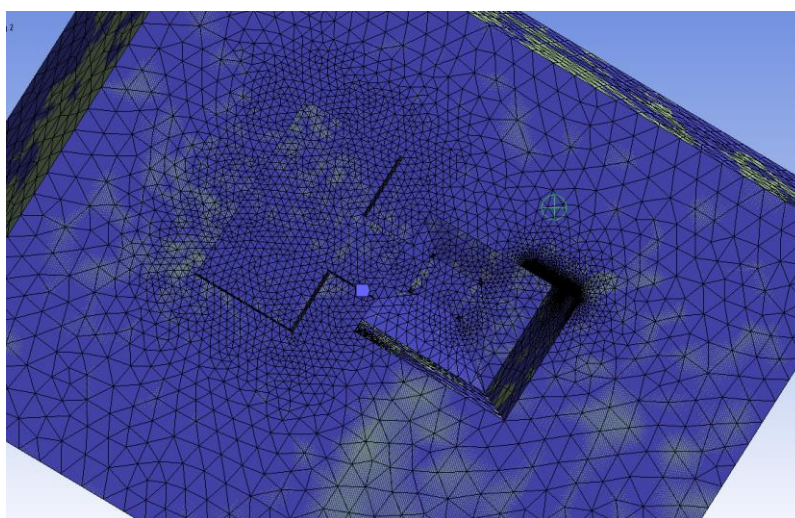


Il·lustració 30. Mallat del model 1. Detall de ranures de portes i finestres.



Il·lustració 29. Mallat del model 1. Detall de ranures i obertures de portes i finestres.

A les superfícies de contacte del volum d'aire de l'atmosfera amb altres de mallat més fi – aire interior i aire pati de llums – s'hi ha definit una mida d'element de 0,15m (veure Il·lustració 31).



Il·lustració 31. Mallat del model. Detall de la part inferior del cos d'aire de l'atmosfera.

4.4. Fluent

Un cop ben definit el model (o els models en aquest cas) i les seves parts i realitzat el mallat i corresponents refinaments, la següent etapa del procés consisteix a configurar les condicions de contorn i les propietats físiques dels casos que a simular.

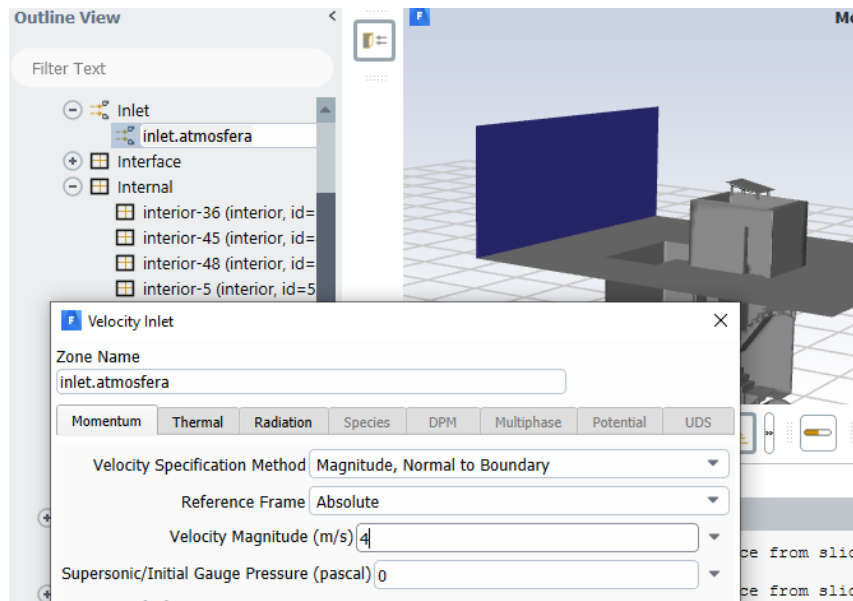
Tanmateix, també s'han de definir els paràmetres matemàtics pels càlculs amb mètodes numèrics i les variables del sistema de les que es vol monitoritzar la seva evolució a mesura que es van produint iteracions.

Tot el que s'ha exposat als anteriors 2 paràgrafs, així com l'execució de les simulacions i l'anàlisi dels resultats, es realitza ja amb el programari ANSYS Fluent.

4.4.1. Entrades i sortides

Durant les etapes anteriors del procés ja s'ha avançat en la definició de les entrades i sortides d'aire de la geometria a simular, anomenant les superfícies per les que es produeix l'intercanvi d'aire amb l'entorn i en quin sentit (respecte al model). A l'apartat *Setup – Boundary Conditions* del Fluent definirem les característiques d'aquests fluxos.

L'única superfície d'entrada – la cara que de l'aire de l'atmosfera que mira al sud oest – s'ha anomenat *inlet.atmosfera*. Un cop ja definida com a tal al Fluent, s'hi ha assignat com un flux uniforme d'entrada – amb una velocitat de l'aire de 4 m/s. Aquesta velocitat s'ha fixat a partir de les dades que es poden veure a la **Error! No s'ha trobat l'origen de la referència.** (tot i que les velocitats més habituals són entorn de 2 m/s es vol simular un cas amb vent persistent de intensitat moderada).

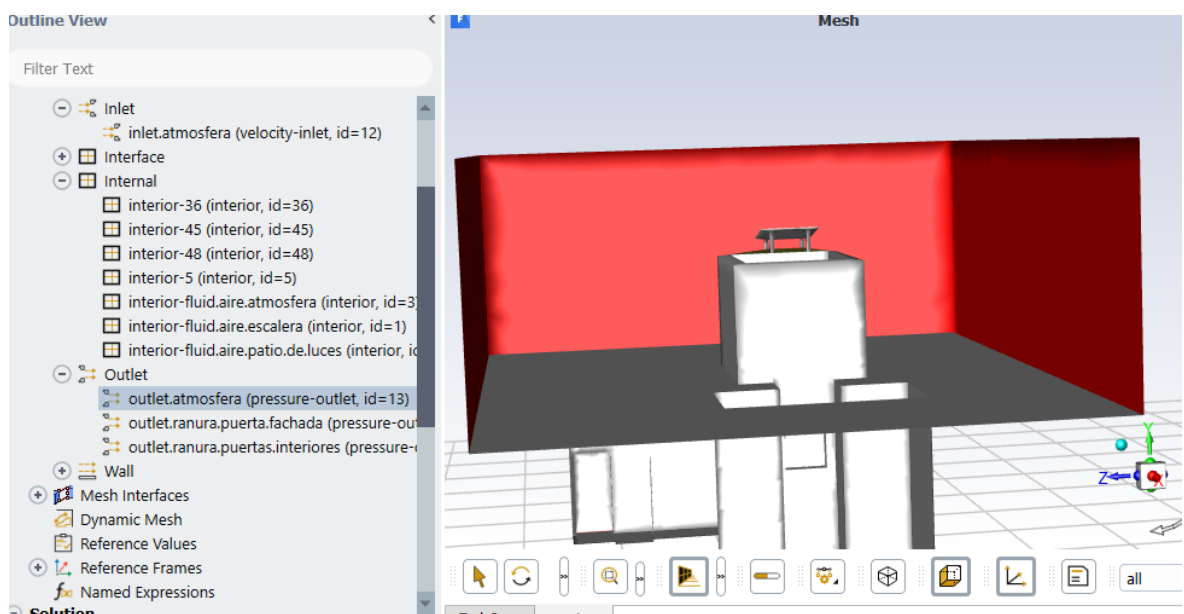


Il·lustració 32. Fluent, definició de l'aire que entra al sistema. Amb efectes tèrmics.

Pel que fa a superfícies de sortida d'aire del model, se n'ha definit 3 diferents:

- Totes les cares del prisma que representa l'aire de l'atmosfera, excepte la base (el terrat de l'edifici) i la cara d'entrada d'aire, *outlet.atmosfera*.
- Totes les ranures de les portes que donen a cadascun dels habitatges de l'edifici, *outlet.ranura.puertas.interiores*.
- La ranura – o ranura i obertura al model 2 – de la porta de la façana principal que dona al carrer, *outlet.ranura.puerta.fachada*.

Totes les sortides han estat definides com a *pressure outlets*, deixant que el flux i la velocitat de l'aire sense fixar i com a resultats dels càlculs de les simulacions.



Il·lustració 33. Fluent. Detall del cos d'aire de l'atmosfera. Destacades les superfícies de sortida d'aire del sistema.

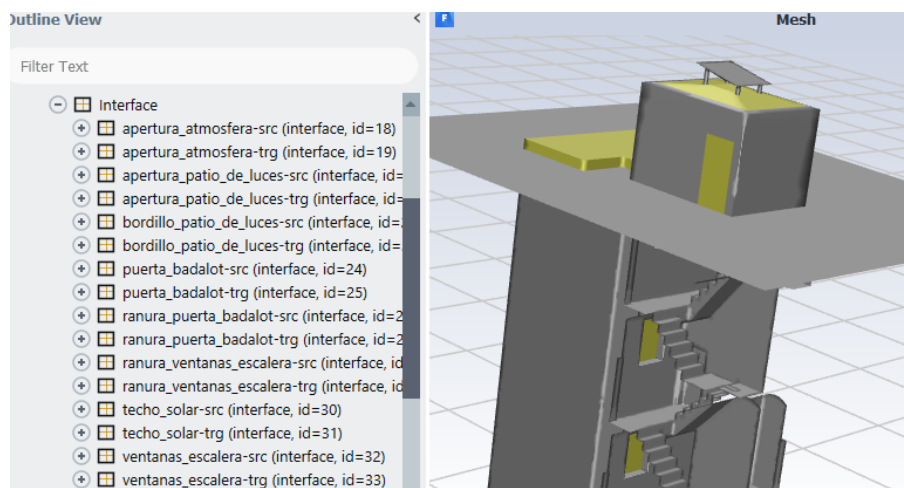
Aquestes condicions de contorn son gairebé les mateixes per tots els casos simulats.

La principal diferència es troba, per cada un dels models, a la superfície de la sortida d'aire corresponent a la *named selection* ranura de la porta principal (amb obertura superior o no).

Als casos amb efectes tèrmics també caldrà definir a la pestanya de diàleg la temperatura a cada entrada o sortida a l'apartat *Thermal* (com es pot veure a la Il·lustració 32). Aquesta temperatura serà la de l'ambient de cada cas a simular.

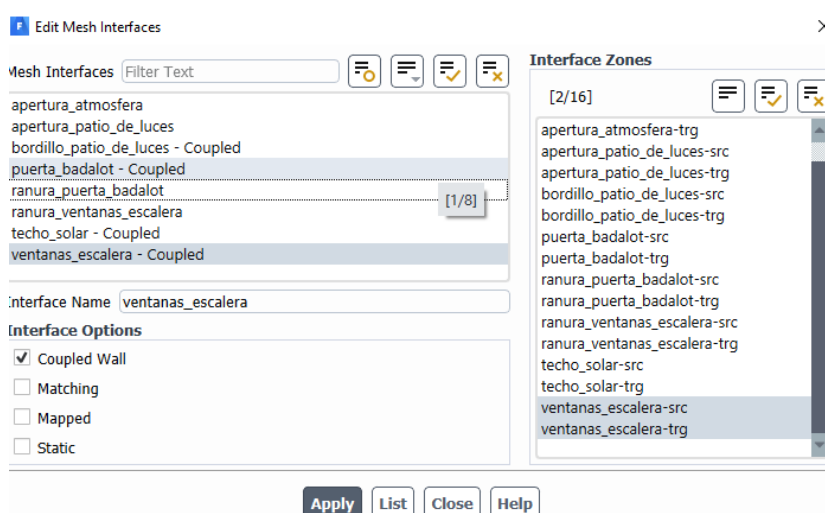
4.4.2. Interfaces i parets

A l'etapa de mallat s'han definit una sèrie de contactes entre els cossos – veure punt 5.3.1. Aquests contactes apareixen com a *Interfaces* al Fluent, és a dir com a superfícies de frontera entre regions de fluid diferents. Això ens permet definir el seu comportament com a paret sòlida (no es permet el pas d'aire a través seu) o com a obertures (sí que es permet el pas d'aire). Cada *interface* té dues cares que pertanyen a cada un dels cossos dels que són frontera.



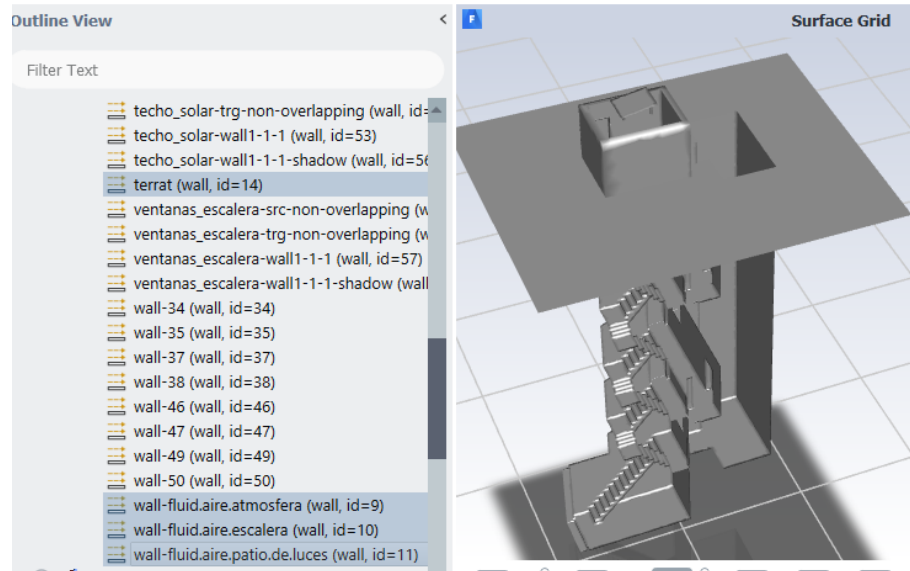
Il·lustració 34. Fluent, llistat d'interfaces i algunes destacades al detall del model.

Mitjançant l'eina *Mesh interfaces* es pot decidir a quines es vol crear una paret sòlida o *coupled wall*. Només cal seleccionar les dues cares corresponents a l'*interface* desitjada i marcar la casella a les seves opcions. A la següent figura es mostra el procedimen



Il·lustració 35. Pestanya de diàleg del Mesh interfaces, qualsevol cas.

Aquelles *Interfaces* que queden marcades com a *coupled wall*, juntament amb totes les superfícies que han quedat entre cossos o entre el model i l'entorn, són considerades parets i apareixen classificades com a *Wall* al programa. A la següent figura (apareixen representats gràficament només les parets que no provenen d'*interfaces*).



Il·lustració 36. Fluent. Llistat de parets sòlides o walls.

4.4.3. Propietats tèrmiques i materials

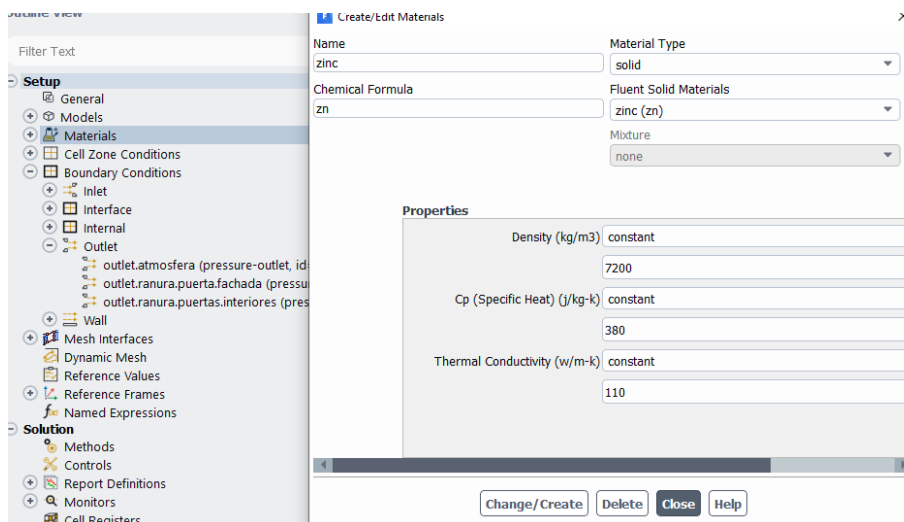
Com ja s'ha esmentat anteriorment en aquest mateix document, inicialment es van dur a terme les simulacions dels 2 models sense tenir en compte els efectes de la temperatura i la irradiació solar. Aquestes simulacions només tenien en compte els efectes mecànics que les geometries del model provocaven al flux d'aire que entra de l'atmosfera (veure apartat 4.4.1).

En aquestes primeres simulacions, els únics materials definits eren l'alumini (sòlid) i el fluid aire, presents a la llibreria que Fluent incorpora de sèrie. No és important el material definit pels sòlids, ja que el moviment de fluid tindrà només causes mecàniques.

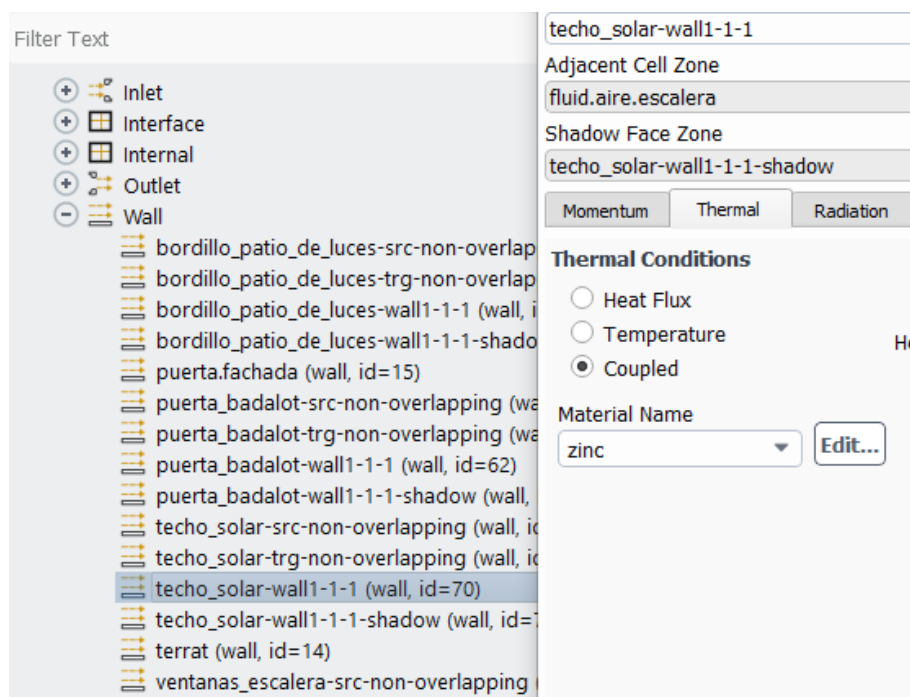
Després de l'obtenció d'aquests primers resultats es va considerar que la realització de noves simulacions amb els efectes tèrmics quedava dins de l'abast del projecte, i era d'interès. Aleshores l'assignació dels materials i/o propietats adients a algunes regions i condicions de contorn del model esdevenen rellevants.

Pel que fa als materials, s'ha demanat a l'equip d'arquitectes quin seria el material utilitzat en la construcció dels nous elements de la coberta. El més probable és que s'utilitzin plaques de zinc. Aquest no està a la base de dades de la versió de Fluent utilitzada, així que s'han

consultat al Codi Tècnic de l'Edificació (CTE, veure **Error! No s'ha trobat l'origen de la referència.**) i s'ha creat un nou material al Fluent amb les mateixes. S'ha assignat aquest nou material a les parets sòlides de la coberta.



Il·lustració 37. Captura de la pestanya Materials de Fluent.



Il·lustració 38. Definició del zinc com a material de la paret sòlida de la coberta.

Per a les noves simulacions també ha estat necessari activar el model energètic i el model de radiació. Al model de radiació, a més, s'ha fet servir la calculadora d'irradiació solar que incorpora el Fluent. Aquesta eina calcula la magnitud i orientació de irradiació solar que rebrà el model a partir de les coordenades geogràfiques i l'orientació dels eixos del model del cas a simular per l'hora, dia i mes que l'usuari decideixi.

També és necessari definir la temperatura de l'aire de l'entorn del model. Això es fa a les pantalles de definició dels *inlets* i *outlets* on, a l'activar el model energètic, es desbloqueja la pestanya *Thermal* on s'introdueix la temperatura volguda.

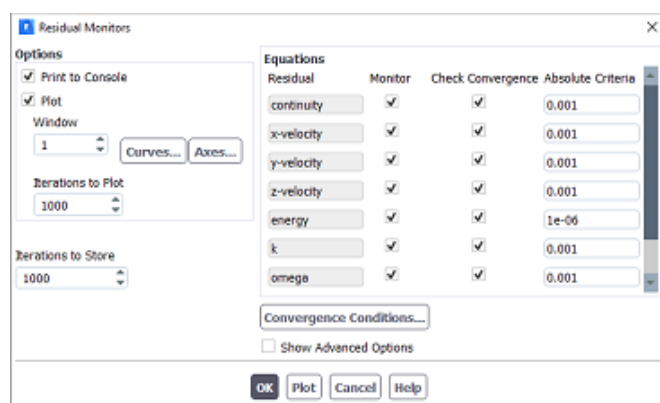
S'ha volgut simular cada model incorporant els efectes tèrmics de les condicions ambientals en dos moments diferents de l'any:

- **Un dia de ple estiu:** amb la irradiació solar d'un 15 de juliol al migdia i una temperatura de 27°C (300,15 K).
- **Un dia de ple hivern:** amb la irradiació solar d'un 15 de gener al migdia i una temperatura de 15°C (288,15 K).

Això ha provocat que es passessin de 2 a 6 casos a simular, 3 casos amb per a cada model – sense efectes tèrmics i amb efectes tèrmics d'un dia d'estiu i d'hivern.

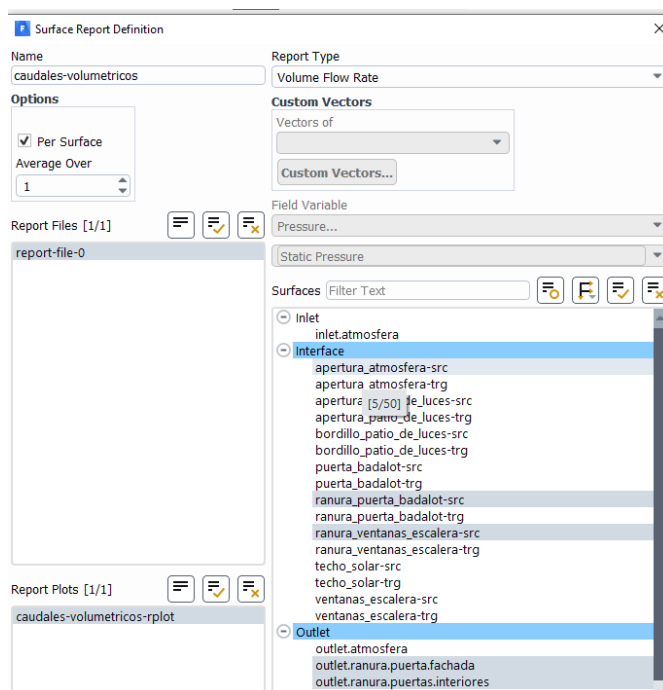
4.4.4. Simulacions

Abans d'executar les simulacions, s'han definit els valors que es volen monitoritzar durant les mateixes. Comencem amb els residuals, que són indicadors de les diferències entre iteracions de determinades variables del sistema, es busca que siguin el més baixos possible i que s'estabilitzin conforme avancen les iteracions.



Il·lustració 39. Fluent. Definició dels residuals a monitoritzar.

També s'ha demanat al programa que monitoritzi els fluxos que circulen per diferents superfícies, i que se'n generi un gràfic conforme avancen les iteracions i se'n guardin els resultat a cada una d'elles en un fitxer.



Il·lustració 40. Definició de variables a monitoritzar. Es demana que es generi un report plot i un report file.

S'ha executat aleshores cada simulació, amb un límit molt gran d'iteracions (4000). S'aturaran quan s'observi als gràfics dels residuals o dels fluxos que els valors s'estabilitzen i les simulacions han convergit.

Les simulacions s'han executat en remot a un ordinador situat al departament de Mecànica de Fluids de l'EEBE (Escola d'Enginyeria Barcelona Est). Aquest ordinador té un processador Intel Core i7-7800X a 3.5 GHz, amb 6 nuclis i la capacitat d'executar 12 processos a l'hora. També té 16GB de RAM, imprescindible per operar amb Fluent, que en consumeix molta.

Les simulacions es deixaven córrer habitualment unes 500 iteracions, tot i que si era observable la convergència (pel gràfic de residuals) molt abans s'aturava. Si passades les 1000 iteracions no s'observava una convergència es considerava que la simulació havia fallat.

4.4.5. Post processament

Un cop aturades les simulacions s'han extret els resultats que han semblat rellevants, principalment s'han elaborat *pathlines*, *contourplots* i s'ha demanat a l'ANSYS algunes integrals volumètriques per trobar valors màxims, mínims i mitjans de variables al cos d'aire a l'interior de l'escala.

Amb els valors de caudal de fluxos volumètrics a les últimes iteracions - s'ha demanat d'emmagatzemar en un *report file* tal com mostra la Il·lustració 40 – s'han calculat les mitjanes aritmètiques d'aquest caudals les últimes 20 iteracions abans d'haver aturat la simulació. Aquests valors els podem trobar a la Taula 1.

5. Resultats

5.1. Valors obtinguts

Per recapitular el que s'ha anat explicant en apartats anteriors, al final s'han simulat 6 casos diferents, se li ha assignat un codi a cada un per a facilitar la referència als mateixos.

- **1NT**: Model 1 (sense obertures a les portes) sense efectes tèrmics.
- **2NT**: Model 2 (amb obertures a les portes) sense efectes tèrmics.
- **1TE**: Model 1 amb els efectes tèrmics d'un dia d'estiu.
- **2TE**: Model 2 amb els efectes tèrmics d'un dia d'estiu.
- **1TH**: Model 1 amb els efectes tèrmics d'un dia d'hivern.
- **2TH**: Model 2 amb els efectes tèrmics d'un dia d'hivern.

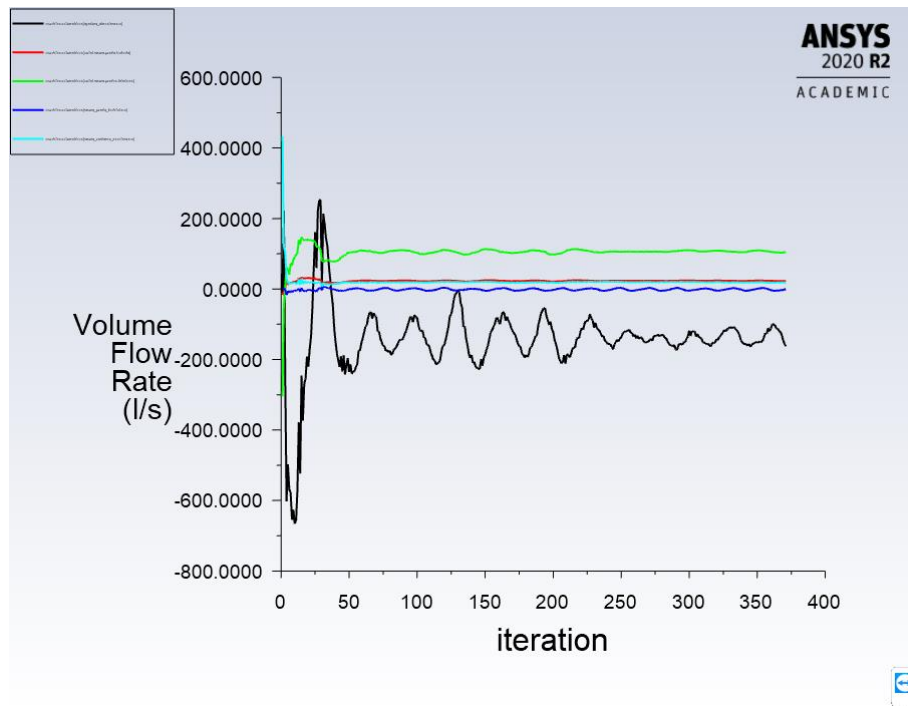
Per a cada cas s'ensenya la simulació de la qual els resultats han acabat convergint, després de corregir alguns errors en algun dels casos. A l'annex (**Error! No s'ha trobat l'origen de la referència.** en endavant) es poden trobar els gràfics d'evolució dels residuals en funció de les iteracions per a cada una d'aquestes simulacions convergents.

Les visualitzacions i resultats que es mostren són les que es consideren més rellevants de cara a l'estudi de la ventilació a l'interior de l'escala de veïns:

- El gràfic de l'evolució segons les iteracions de càlcul dels fluxos d'entrada i sortida (configurat com un *report plot* al Fluent).
- Els valors definitius s'han calculat fent la mitja de les últimes 15 iteracions abans d'haver aturat la simulació – a l'observar que ja convergia en resultats estables. Aquests s'exposaran a la Taula 2 de l'apartat 5.2.
- Una visualització dels *pathlines* de velocitat de l'aire dins del volum de l'escala de veïns.
- La velocitat mitjana de l'aire a l'interior de l'escala de veïns. Aquests s'exposaran a la Taula 3 de l'apartat 5.2.

La resta de resultats i visualitzacions que s'han extret es poden trobar a l'annex.

5.1.1. Cas sense obertures a les portes ni efectes tèrmics (1NT)



Il·lustració 41. Evolució durant la simulació d'entrades i sortides d'aire interior (1NT).

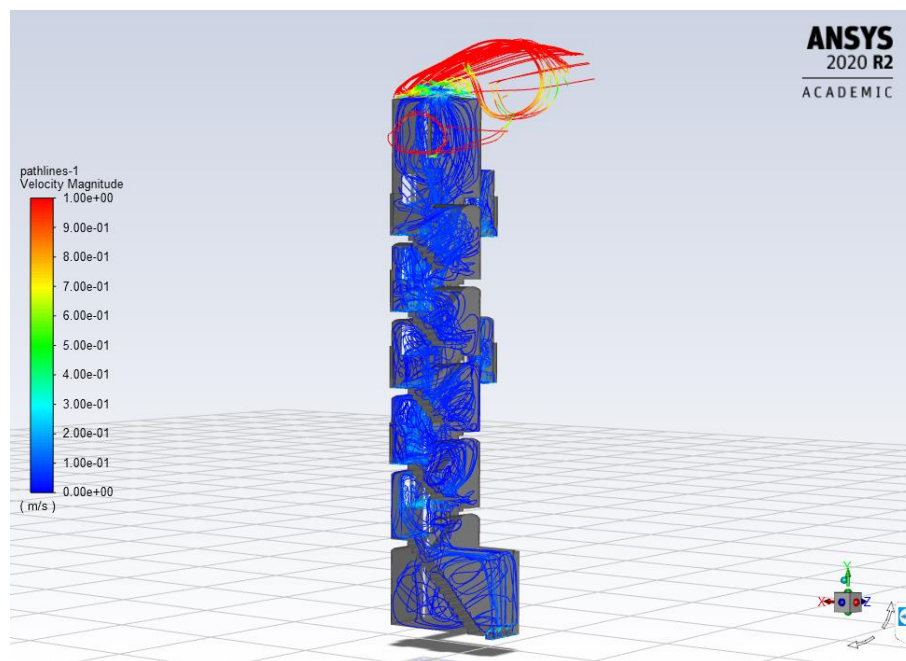
A la figura anterior es pot observar com els valors comencen a estabilitzar-se a partir de la iteració 250, i com la simulació s'ha aturat unes 125 iteracions més tard, aproximadament a la 375.

A la figura també es mostra com en aquest cas l'aire bàsicament surt de l'interior de l'escala de veïns per l'obertura de la coberta. No és llegible la llegenda, però la línia que representa aquest flux és la negra.

El valor d'aquest principal flux de sortida que hi ha acaba oscil·lant al voltant dels 150 litres d'aire per segon – al gràfic surt en negatiu, ja que està expressat respecte al volum interior. A l'arxiu de resultats per a cada iteració també s'ha pogut observar com surt un petit flux d'aire de la ranura de la porta del badalot. Aquest és d'uns 15 litres per segon i està representat per la línia blava.

Les línies gorga, blanca i vermella representen, respectivament, els fluxos d'aire per les ranures de les portes interiors o portes d'accés als apartaments de l'edifici, per les ranures de les finestres de l'escala i per la ranura de la porta principal. En aquest cas els tres són d'entrada i per tant positius al gràfic.

La correspondència entre colors de línia i fluxos és la mateixa per a tots els gràfics de caudals.



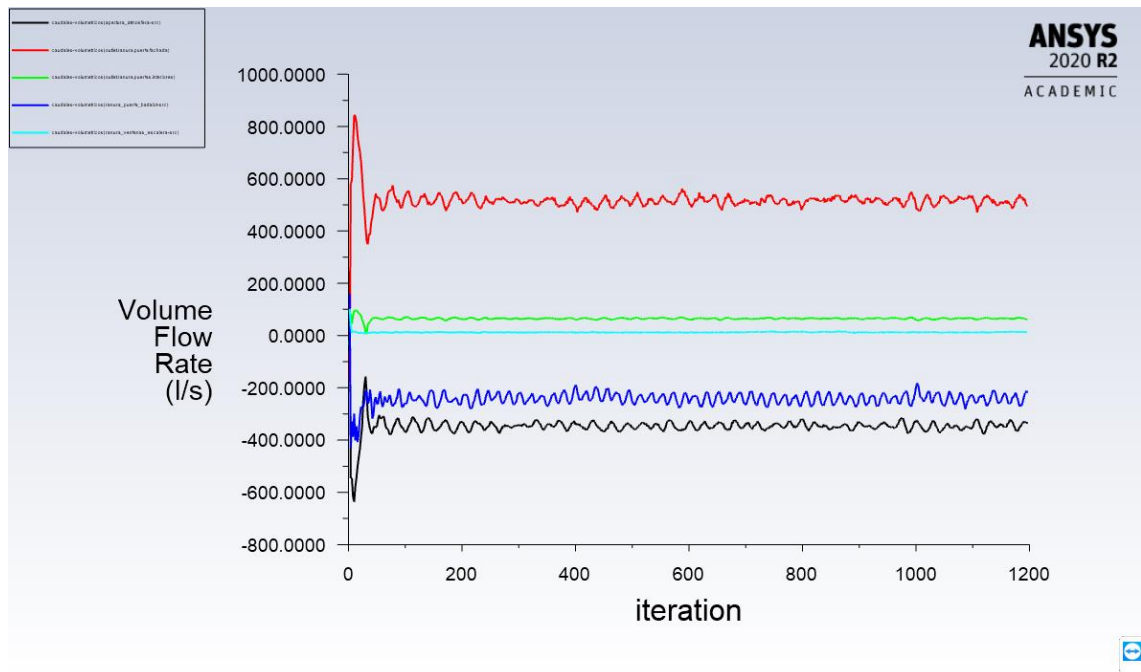
Il·lustració 42. Pathlines de velocitat del cas 1NT.

A l'anterior figura es poden observar principalment dos fenòmens, que s'exposen a continuació.

Als primers pisos hi circula menys aire i a menys velocitat que als últims. A mesura que incorporem zones per on entra l'aire (ranures finestres i portes d'apartaments), s'acumula més aire i a més velocitat. A la planta baixa, i fins al primer pis, l'únic aire que circula és el que entra per la petita ranura a la part inferior de la porta principal.

Pel que fa a les sortides, es pot comprovar el que ja hem comentat a l'analitzar els valors dels fluxos d'entrada i sortida de l'escala de veïns. L'aire, com és normal per la diferència de superfícies, surt principalment per la obertura de la coberta i en molt menor mesura per la petita ranura a la part inferior de la porta del badalot.

5.1.2. Cas amb obertures i sense efectes tèrmics (2NT)



Il·lustració 43. Evolució durant la simulació d'entrades i sortides d'aire interior (2NT).

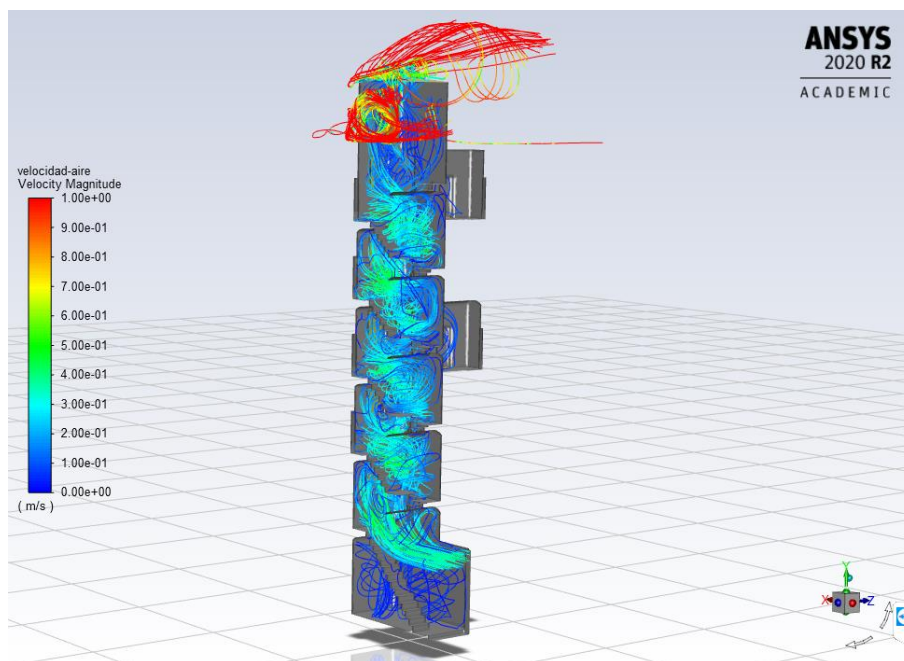
A la figura anterior es pot observar com els valors comencen a estabilitzar-se a partir de la iteració 250, i com la simulació s'ha deixat córrer fins la iteració 1200 – bàsicament perquè es va deixar simulant durant la nit.

El principal canvi es s'observa en les sortides d'aire respecte el cas anterior és l'increment del flux de sortida per les obertures de la porta del badalot (línia blava). Ara és d'uns 200 litres per segon respecte als 15 d'abans. Aquest és natural, ja que en aquest cas hi ha l'obertura d'un 20% de la superfície d'aquesta porta. Per contra en el cas anterior només hi ha la ranura a la part inferior.

El flux de sortida per l'obertura de la coberta (línia negra) també augmenta respecte al cas anterior, d'uns 150 litres per segona una mica més de 300.

Els fluxos per la resta de zones són d'entrada i per tant positius al gràfic.

El flux d'entrada per les obertures de la porta principal (línia vermella) també augmenta significativament respecte al cas anterior. Aquest fet també el produeix el canvi en aquestes obertures, anàlogament que el que succeeix amb la porta del badalot. Aquest flux és el més gran d'entrada de manera de manera destacada.



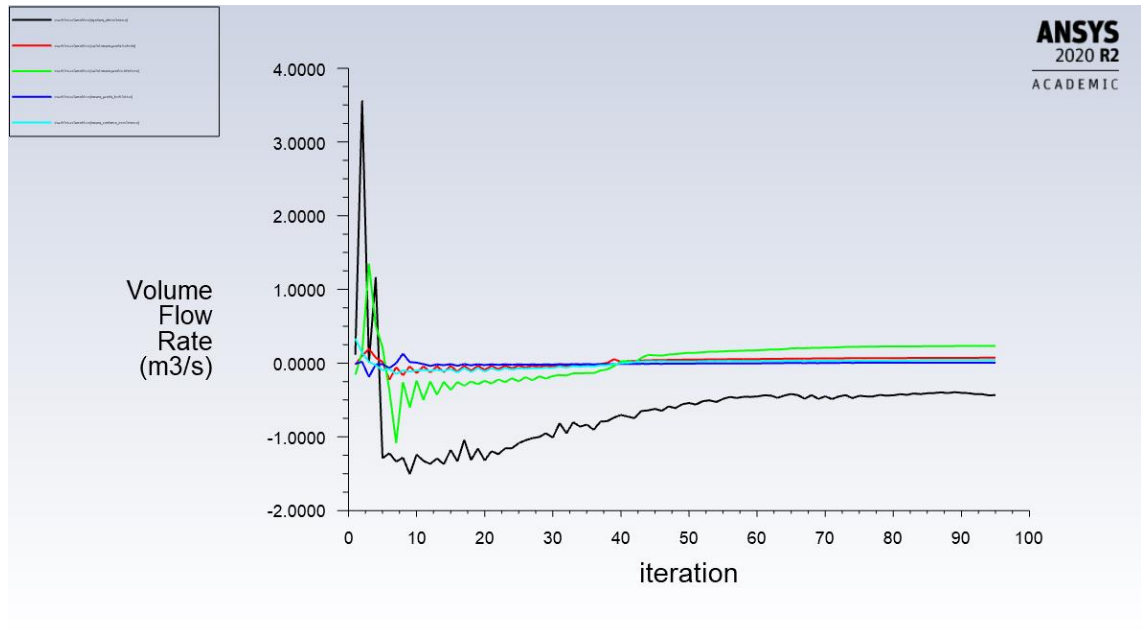
Il·lustració 44. Pathlines de velocitat del cas 2NT.

Los *pathlines* de la figura anterior es pot observar, tal i com ja es pot veure al gràfic de fluxos, que el principal flux d'entrada d'aire a l'escala de veïns és el que passa per l'obertura de la porta principal. Això fa que hi hagi velocitats més grans als primers pisos – al cas sense obertura això no passava.

També s'hi pot observar com la sortida d'aire es reparteix entre els fluxos que circulen per l'obertura de la porta del badalot i l'obertura de la coberta. Al cas anterior principalment l'aire sortia per la coberta.

Un cop s'han obtingut els resultats de les simulacions dels dos primers casos, s'ha considerat interessant i dins de l'abast temporal del projecte preparar i fer córrer simulacions pels quatre casos dels següents apartats. En aquestes noves simulacions no es simularan les dues configuracions geomètriques dels dos que s'han exposat fins ara, però s'inclouran els efectes tèrmics – ja explicats en apartats anteriors – per veure com varien els fluxos i les velocitats analitzats.

5.1.3. Cas sense obertures i amb efectes tèrmics d'estiu (1TE)



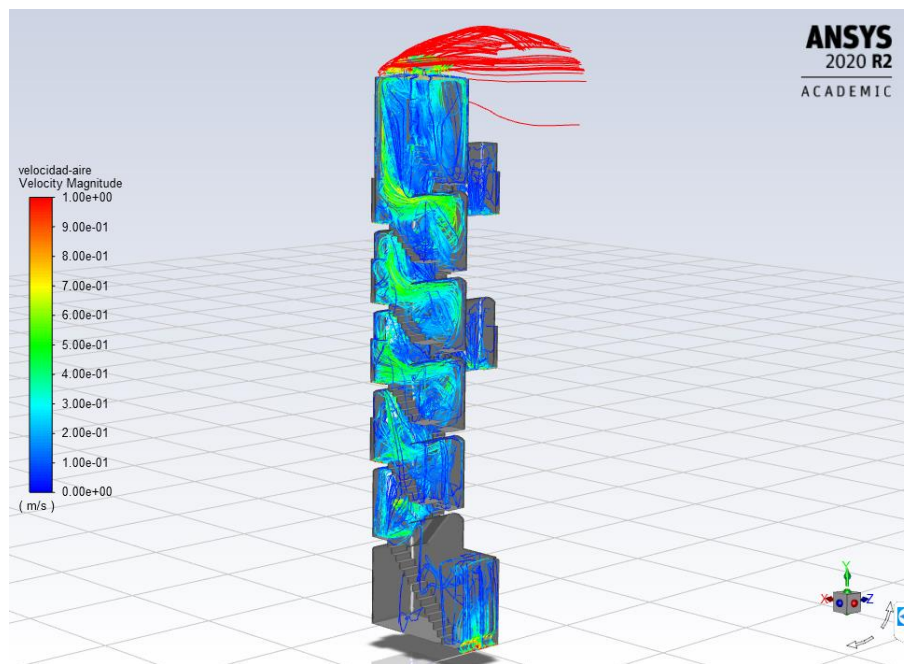
Il·lustració 45. Evolució durant la simulació d'entrades i sortides d'aire interior (1TE).

A la figura anterior es pot observar com els valors comencen a estabilitzar-se a partir de la iteració 60, i com la simulació s'ha deixat córrer fins la iteració 95, aproximadament. Aquesta simulació ja s'havia deixat córrer prèviament moltes més iteracions sense que variessin els resultats, però el fitxer es va perdre.

En aquest cas l'únic flux que al final de la simulació té un valor negatiu, i per tant de sortida, és el que passa per l'obertura de la coberta del badalot (línia negra). Aquest fet no difereix gaire del que succeeix al cas simulat a l'apartat 5.1.1 (el mateix model sense efectes tèrmics). El que sí que varia bastant és el caudal d'aquest flux, d'uns 475 litres (0,475 m³/s) per segon respecte als 140 del cas 1NT.

La variació que s'explica al cas anterior semblaria indicar que els efectes tèrmics, bàsicament l'aparició de la convecció natural per escalfament de la coberta, fa variar substancialment el moviment d'aire al Model 1.

La resta de fluxos són positius o d'entrada a l'escala de veïns. Tot i que costa d'observar al gràfic, el flux que entra per les portes dels apartaments (línia groga) és el principal d'entrada de manera destaca i té un valor d'uns 245 litres per segon (0,245 m³/s). Aquest valor és substancialment més gran al del cas 1NT. A l'augmentar el flux total de sortida han d'augmentar els d'entrada.

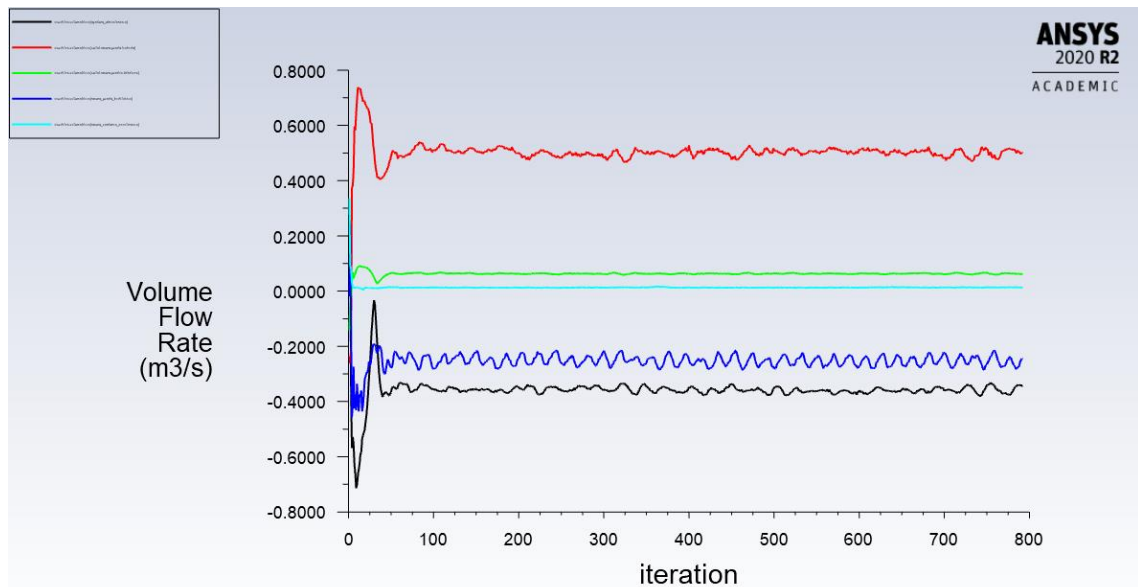


Il·lustració 46. Pathlines de velocitat del cas 1TE.

De l'observació de la figura anterior se'n destil·len inicialment conclusions molt semblants a les que s'exposen a l'apartat 5.1.1 respecte a la figura anàloga del cas 1NT. Hi ha poca circulació d'aire i a baixes velocitats als primers pisos i la distribució d'entrades i sortides són les mateixes.

No obstant, el que sí es pot observar de manera diferent al cas 1NT és que als pisos superiors les velocitats són més grans (els colors són més vius).

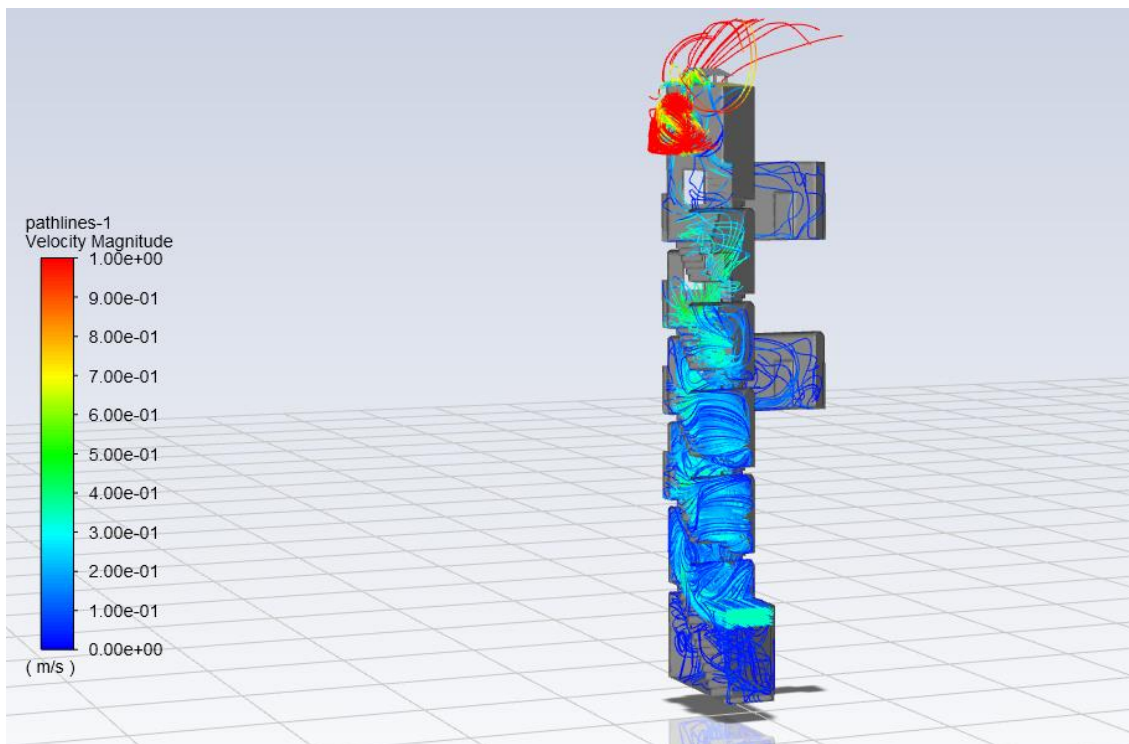
5.1.4. Cas amb obertures i efectes tèrmics d'estiu (2TE)



Il·lustració 47. Evolució durant la simulació d'entrades i sortides d'aire interior (2TE).

A la figura anterior es pot observar com els valors comencen a estabilitzar-se abans de les 100 iteracions, i com la simulació s'ha deixat córrer fins casi 800 iteracions – bàsicament perquè es va deixar simulant durant la nit.

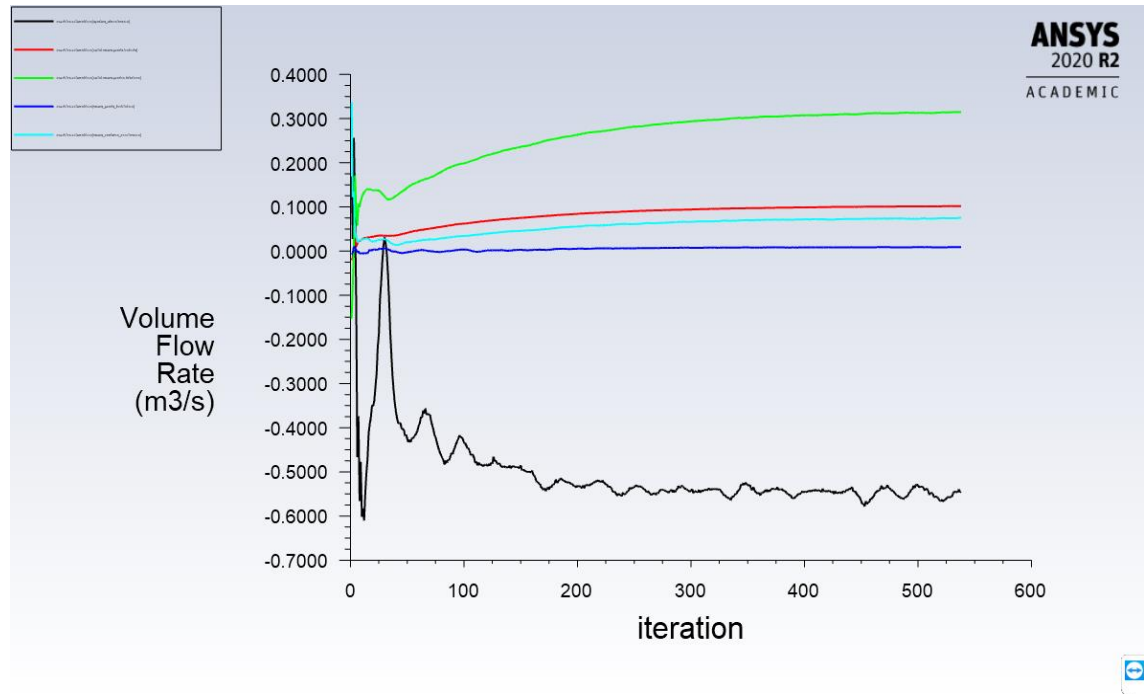
La distribució i valors dels caudals dels fluxos de sortida son similars als exposats a l'apartat 5.1.2 respecte al cas 2NT. La distribució i valors dels caudals dels fluxos d'entrada també son similars als del cas 2NT. Els valors del caudal són del mateix ordre, però una mica més grans (veure Taula 1 a l'apartat 5.2).



Il·lustració 48. Pathlines de velocitat del cas 2TE.

De l'observació de la figura anterior se'n destil·len inicialment conclusions molt semblants a les que s'exposen a l'apartat 5.1.2 respecte a la figura anàloga del cas 2NT. Hi ha poca prou d'aire i a velocitats gens menyspreables als primers pisos i la distribució d'entrades i sortides són les mateixes.

5.1.5. Cas sense obertures i amb efectes tèrmics d'hivern (1TH)

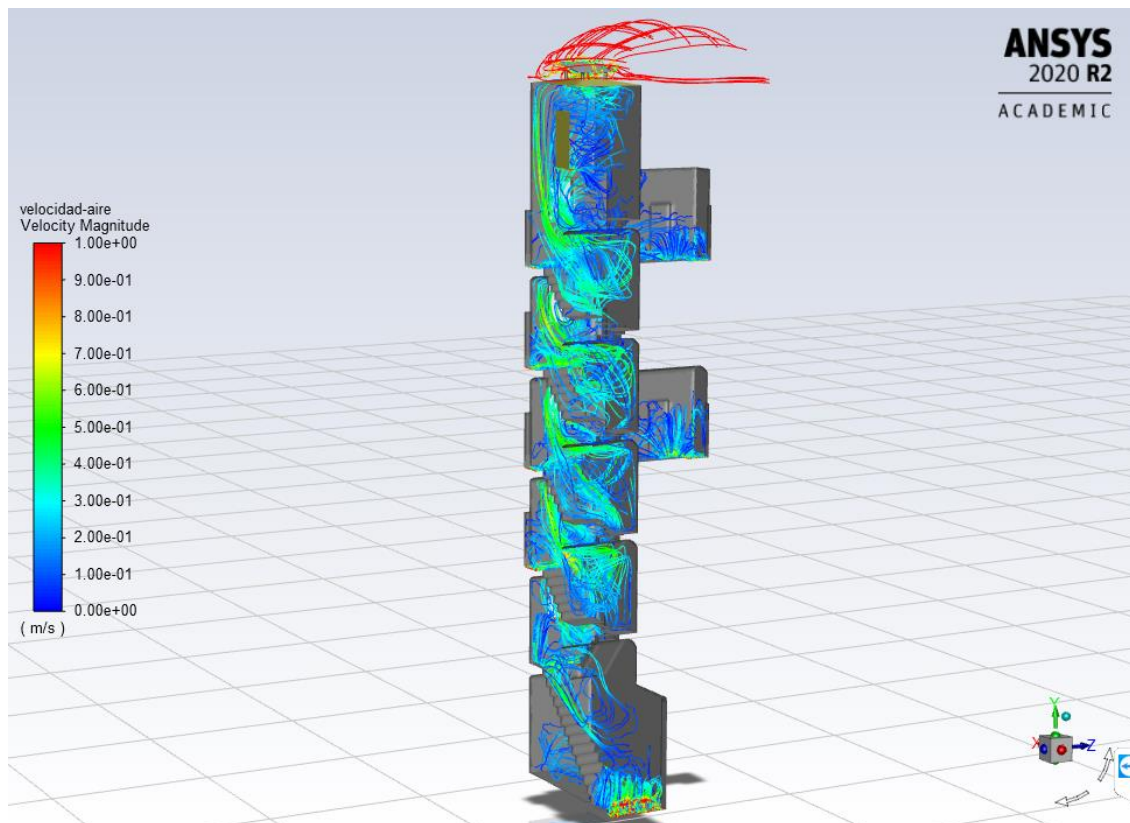


Il·lustració 49. Evolució durant la simulació d'entrades i sortides d'aire interior (1TH).

A la figura anterior es pot observar com els valors comencen a estabilitzar-se abans de les 300 iteracions, i com la simulació s'ha deixat córrer fins a casi 550 iteracions.

La distribució de fluxos d'entrada i sortida són molt similars als del cas 1TE exposats a l'apartat 5.1.3.

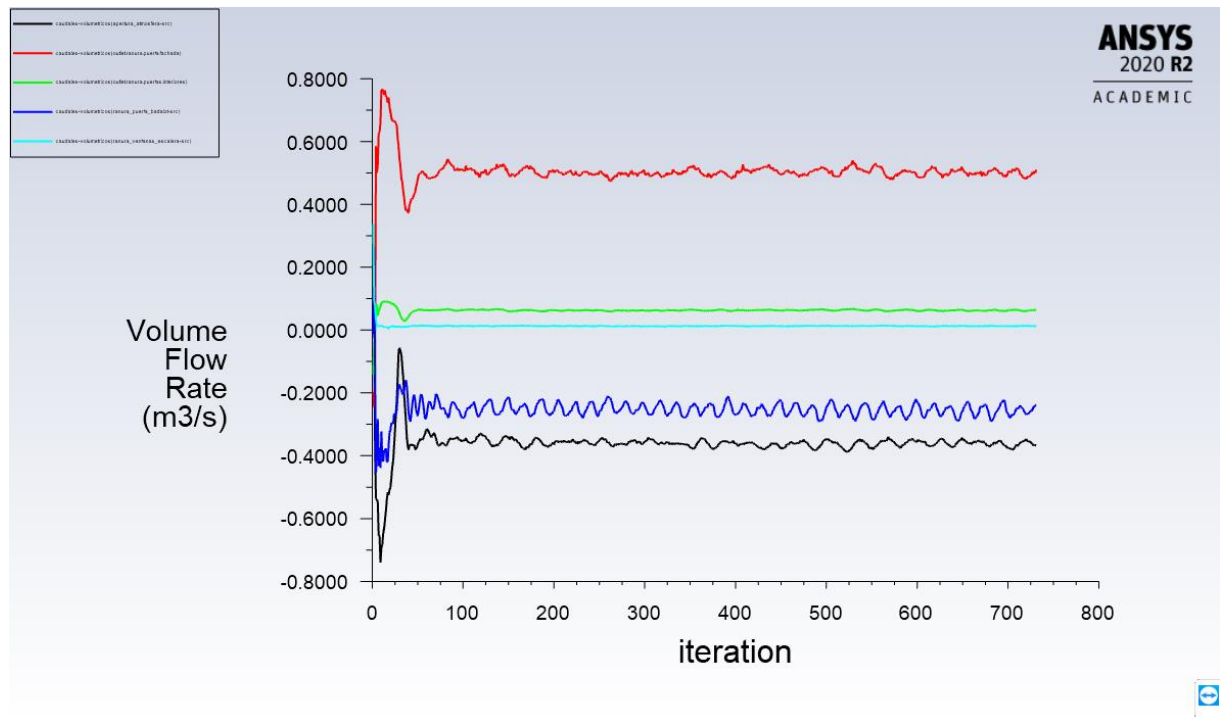
Pel que fa als caudals, són més grans que els del cas anàleg en condicions d'estiu. Per exemple, l'únic flux de sortida és el de la coberta (línia negra) amb un caudal d'uns 550 litres per segon ($0,55 \text{ m}^3/\text{s}$), uns 75 més que al cas 1TE. El principal d'entrada, el de les portes dels apartaments és d'uns 300 litres per segon, 50 més que al cas amb condicions d'un dia d'estiu.



Il·lustració 50. Pathlines de velocitat del cas 2TH.

De l'observació de la figura anterior se'n destil·len conclusions molt similars a les exposades a l'apartat 5.1.2 sobre el cas 1TE. Hi ha poca circulació d'aire i a poca velocitat als primers pisos. Cal recordar que la porta principal no té la obertura en aquest model. Les velocitats als pisos superiors son similars a les del cas 1TE, més grans que les del cas 1NT.

5.1.6. Cas amb obertures i efectes tèrmics d'hivern (2TH)



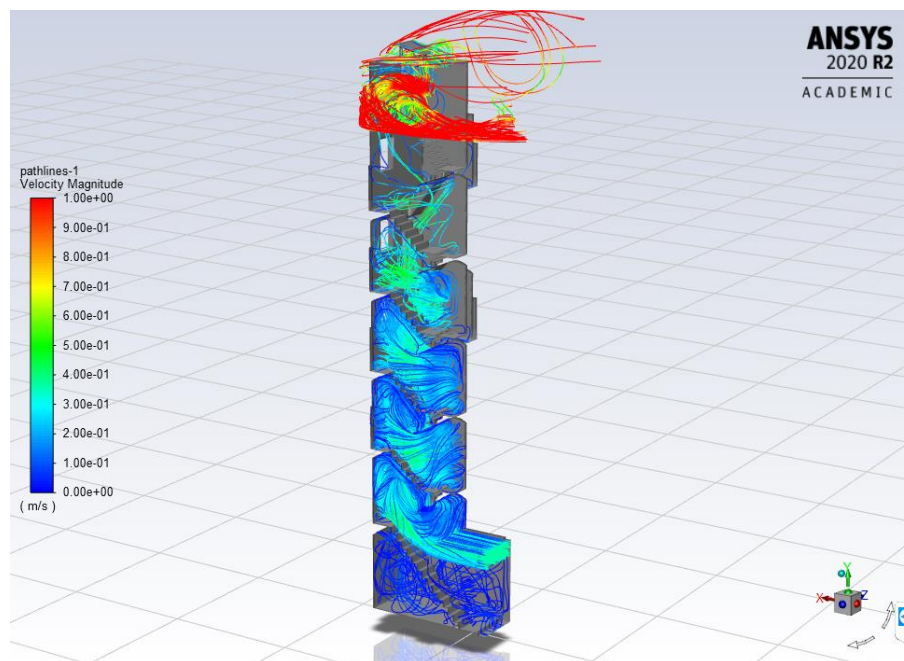
Il·lustració 51. Evolució durant la simulació d'entrades i sortides d'aire interior (2TH).

A la figura anterior es pot observar com els valors comencen a estabilitzar-se abans de les 150 iteracions, i com la simulació s'ha deixat córrer fins casi 750 iteracions – bàsicament perquè es va deixar simulant durant la nit.

La distribució dels fluxos d'entrada i sortida i els caudals dels mateixos són molt similars als exposats al cas 5.1.4 respecte al cas 2TE.

Existeix una mínima variació respecte als resultats del cas 2TE, pel que fa als fluxos de sortida. Els caudal del flux per la obertura de la coberta del badalot augmenta una mica i el caudal per les obertures de la porta del badalot disminueix anàlogament – uns 6-7 l/s cada variació (veure Taula 1 a l'apartat 5.2).

Cal recordar que el gradient de temperatura serà superior a l'hivern, ja que l'aire de l'atmosfera estarà més fred. La irradiació solar serà també inferior, però la simulació està configurada per un dels moments de màxima irradiació del dia, al migdia.



Il·lustració 52. Pathlines de velocitat del cas 2TH.

De l'observació de la figura anterior se'n destil·len conclusions molt similars a les exposades a l'apartat 5.1.2 sobre el cas 2TE. Hi ha circulació d'aire i a velocitats significatives als primers pisos. Cal recordar que la porta principal té la obertura a la part superior en aquest model. Les velocitats als pisos superiors són similars a les del cas 1TE, més grans que les del cas 1NT.

5.2. Comparativa de resultats

Tot i que la observació en detall de cada cas és important, la comparativa dels resultats és el que permetrà extreure conclusions. A continuació es pot veure una taula que compara els valors dels caudals de fluxos de sortida, un dels indicadors que s'han considerat més importants per l'anàlisi.

A la **Error! No s'ha trobat l'origen de la referència.** s'han afegit el valor del flux total de sortida de l'estat actual de l'edifici, extrets de la simulació realitzada pel Luis Gámez [9]. A la taula s'hi fa referència amb el nom de "cas EA".

Taula 1. Comparativa de resultats de les simulacions. Fluxos de sortida.

CAS	Caudals de sortida (l/s)			Renovacions per hora volum escala*	Variació respecte EA (%)	Variació respecte NT (%)
	Obertura Sostre	Porta badalot	TOTAL			
EA	-	-	7,45	0,15	-	-
1NT	142,34	14,23	156,57	3,07	2001,6%	-
2NT	347,09	239,53	586,62	11,49	7774,1%	-
1TE	475,40	-	475,40	9,31	6281,2%	203,6%
2TE	353,18	262,02	615,20	12,05	8157,7%	4,9%
1TH	551,19	-	551,19	10,79	7298,5%	252,0%
2TH	357,40	255,01	612,41	11,99	8120,3%	4,4%

*El volum d'aire que hi ha dins de l'escala de veïns és de 183,83 m³ (183.830 litres).

De l'anàlisi de la taula se n'extreuen les següents observacions:

- Tots els casos simulats en aquest treball milloren de manera substancial el moviment d'aire a l'interior de l'escala de veïns.
- La geometria representada al Model 2, amb les obertures a la part superior de les portes del badalot i la principal d'accés des del carrer, és més eficient a l'hora de millorar el moviment del global de volum d'aire dins l'escala de veïns.
- El moviment d'aire millora substancialment al casos amb el Model 1 quan s'incorporen els efectes tèrmics, particularment en condicions d'un dia assolat d'hivern (1TH).
- La incorporació d'efectes tèrmics no provoca variacions significatives en els casos del Model 2, amb les obertures a les portes.
- El casos 2TE i 2TH tenen resultats semblants, tot i que es produeix un petit canvi en la distribució dels caudals fluxos de sortida, una variació d'uns 6-7 l/s, d'augment al flux per l'obertura de la coberta del badalot corresponent a la disminució al flux per les obertures de la porta del badalot.

La Taula 2 que es mostra a continuació s'ha elaborat amb els valors obtinguts a cada simulació dels fluxos (d'entrada a l'interior de l'escala de veïns a cada cas) per les ranures a la part inferior de les portes d'accés als diferents pisos o apartaments de l'edifici.

Aquests fluxos s'han considerat d'interès perquè poden servir per ventilar els apartaments, petits i mal ventilats en general, però el seu anàlisi i la seva millora no són part de l'objectiu del treball. També és interessant analitzar els fenòmens que poden provocar les diferències en aquests resultats.

A la Taula 2 també s'hi ha afegit el valor mig de la velocitat de l'aire a l'interior de l'escala de veïns, tot i que els diferents *pathlines* mostrats a l'apartat 5.1 són més útils a l'hora d'analitzar aquestes velocitats i la circulació d'aire dins l'escala. Aquesta velocitat mitja, de fet, s'ha fet servir per decidir el rang de velocitats a l'hora de crear els *pathlines*.

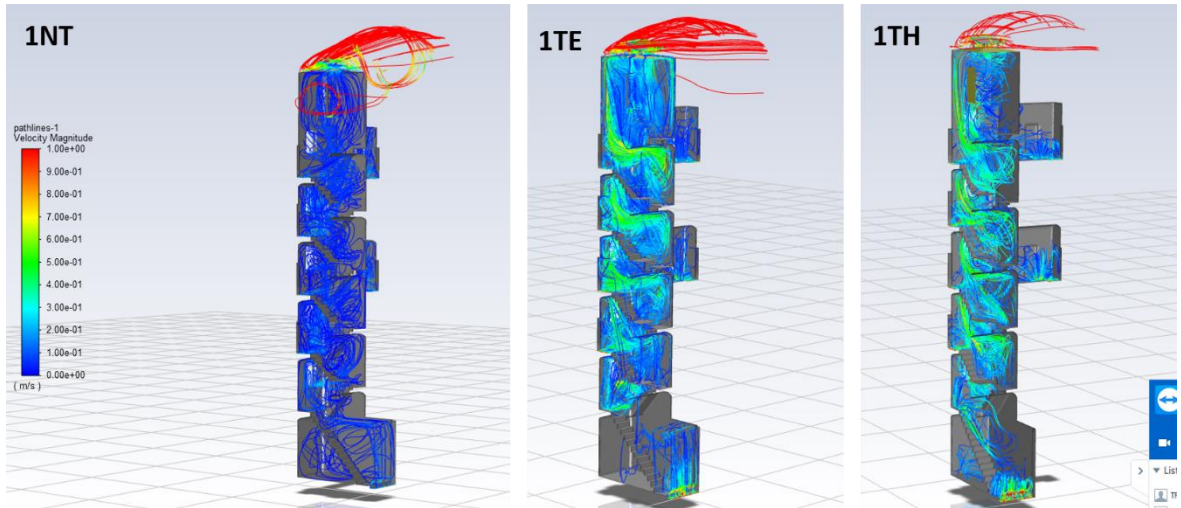
Taula 2. Comparativa de resultats entre casos.

CAS	Ventilació pisos – Σ caudals portes interiors (l/s)	Variació respecte NT (%)	Variació (%)	Velocitat mitja del l'aire (m/s)
EA	6,10	-	-	-
1NT	105,89	-	1635,9%	0,049
2NT	64,74	-	961,3%	0,166
1TE	245,61	131,9%	3926,4%	0,192
2TE	63,49	-1,9%	940,8%	0,168
1TH	314,41	196,9%	5054,3%	0,204
2TH	62,27	-3,8%	920,8%	0,169

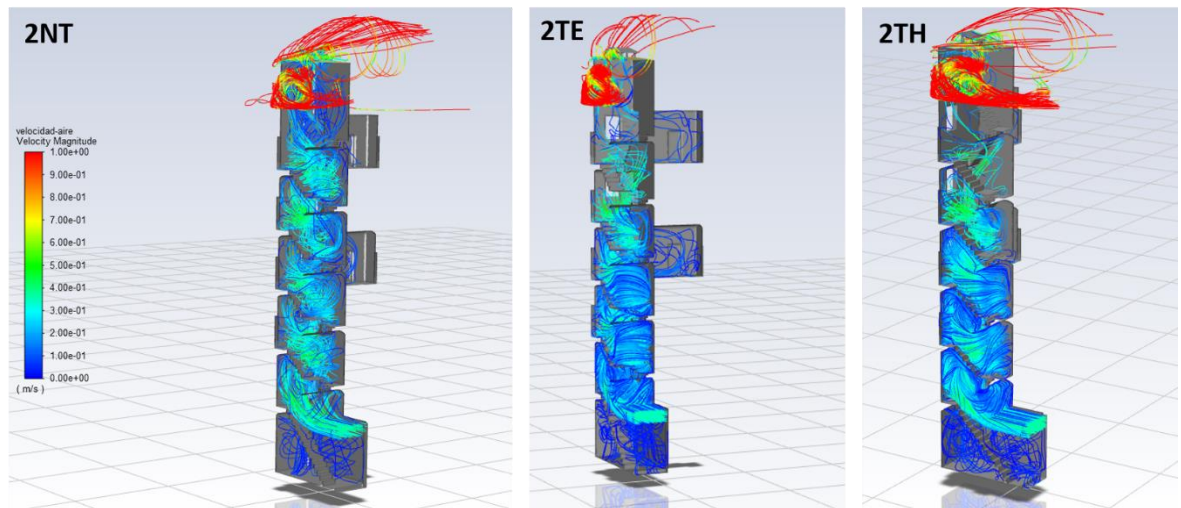
De l'anàlisi de la Taula 2 se n'extreuen les següents observacions:

- La incorporació dels efectes tèrmics a les simulacions amb el Model 1 (sense obertures) provoca un clar augment dels caudals de fluxos d'entrada d'aire a l'escala de veïns des dels pisos.
- Per contra, la incorporació dels efectes tèrmics provoca una petita disminució d'aquests caudals.
- Tant l'augment com la disminució dels punts anteriors són més importants en condicions d'un dia d'hivern.
- La dada de la velocitat mitja de l'aire a l'interior de l'escala de veïns no aporta gaire valor.

A més dels valors numèrics, és interessant realitzar una comparativa dels *pathlines* de velocitats de l'aire interior obtinguts per cada simulació. Les figures següents (il·lustracions ens els mostren.



Il·lustració 53. Pathlines de velocitat dels casos amb el model 1.



Il·lustració 54. Pathlines de velocitat dels casos amb el model 2.

De la visualització de les figures anteriors se n'extreuen les següents observacions:

- La geometria del model 2 fa que les velocitats als primers pisos siguin 2 i 3 cops més grans, gràcies l'obertura de la porta principal.
- Els efectes tèrmics tenen un gran efecte en les velocitats als pisos superiors, probablement perquè els caudals.
- Sense efectes tèrmics, les velocitats del model 1 són molt baixes (ja es podia amb les velocitats mitjanes a la Taula 2).

Conclusions

Les conclusions que s'extreuen directament de l'anàlisi del que s'ha exposat a l'apartat de comparativa de resultats (5.2) i dels coneixements sobre la convecció que s'exposen a l'apartat 3.2, són les següents:

- **Qualsevol de les noves geometries millora substancialment el moviment d'aire dins l'escala de veïns, respecte a l'estat actual de l'edifici.** Els increments són de com a mínim del 2000% i en general de l'ordre d'un 7000%.
- **Al model 1 la convecció natural és molt més important que la forçada.** S'observa que els casos als que s'incorporen els efectes tèrmics milloren molt moviment d'aire. Per efectes mecànics s'aconsegueix millorar la ventilació, però el cas sense efectes tèrmics i aquesta geometria és clarament el pitjor en aquest sentit. És qüestionable el funcionament de la geometria per a provocar l'efecte Venturi volgut.
- **Al model 2 la convecció forçada és molt més important que la natural.** Les obertures que s'han creat a les portes d'accés del carrer i al terrat provoquen un augment significatiu del moviment d'aire per efectes mecànics. L'aparició dels efectes tèrmics provoca una increment mínim del moviment general de l'aire.
- **La geometria del model 1 pot ajudar a una millor ventilació dels pisos.** Al contrari del que passa amb el model 2, on la principal entrada d'aire és la gran obertura de la porta principal, a les simulacions amb el model 1 la principal font d'entrada d'aire són els pisos o apartaments de l'edifici.
- **La geometria del model 2 ajuda a tenir una millor circulació d'aire als pisos inferiors, on hi ha el principal problema d'humitats.** La obertura de la porta d'accés des del carrer fa que hi hagi un flux important de ventilació i velocitats més elevades de l'aire ja als pisos inferiors. Això resulta molt rellevant per aquest projecte, ja que el seu objectiu és millorar el moviment d'aire i la convecció de massa d'aigua per a combatre els problemes d'humitats per capil·laritat.

Altres conclusions, menys importants, que podem treure de l'observació dels resultats:

- Les condicions d'hivern provoquen canvis en els resultats respecte a les d'estiu, tant en les simulacions del model 1 on els efectes tèrmics són més importants com en les del model 2. En general a l'hivern el flux de sortida per la obertura de la coberta s'incrementa respecte a l'estiu, probablement pel major gradient de temperatures que hi haurà entre aire ambient i la coberta escalfada pel sol.
- Per les ranures de les finestres de l'escala al pati de llums el flux sempre és d'entrada, tot i que d'un caudal poc significatiu.

Pel que fa al global del projecte, les conclusions que s'han tret de tota la feina feta són les següents:

- ✓ **El disseny que s'ha simulat compleix el seu objectiu, però potser es podria simplificar:**
 - És evident que qualsevol de les possibles actuacions que s'han simulat **compleix amb l'objectiu principal de millorar la ventilació** de l'escala de veïns.
 - No obstant, la incorporació de les obertures de les portes del badalot i principal al model ha tingut un efecte molt gran en els resultats. Això fa que es pugui **qüestionar fins a quin punt influeix l'efecte venturi** i el fet de si la part elevada de la coberta pot tenir una geometria més simple que no intenti simular una tovera.
 - Es podria, inclús, qüestionar si és **necessària l'obertura a la coberta** o la geometria del model 2 ja podria ser útil només amb l'obertura de la porta del badalot. Cal remarcar, però, que l'obertura de la coberta és en tots els casos la principal sortida d'aire.
 - Com més simple sigui el disseny i fàcil l'actuació a realitzar millor, com ja s'ha dit a l'apartat

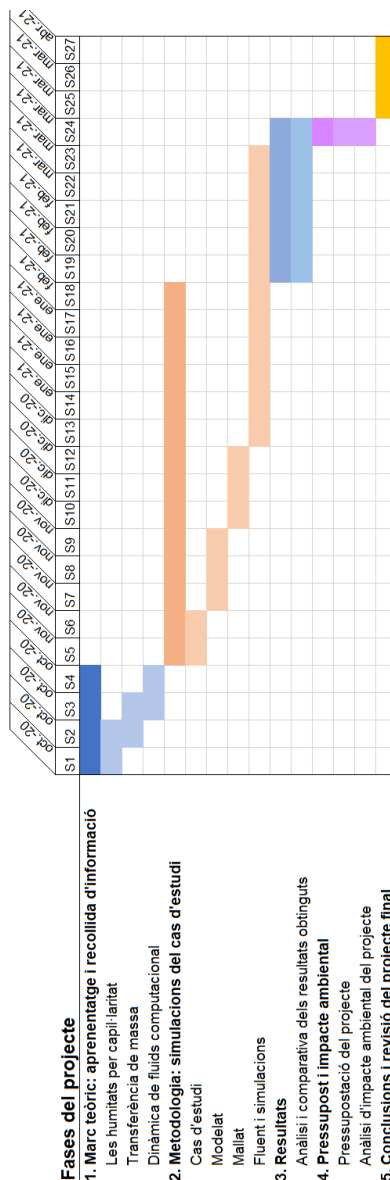
- ✓ **Les obertures a les portes són una bona idea, però potser convindria canviar la situació:**
 - És evident que la incorporació d'aquestes obertures milloren la ventilació en general per efectes mecànics i, per tant, la convecció forçada de massa.
 - Les obertures provoquen que hi hagi millor **circulació i velocitats més grans d'aire als pisos inferior**, cosa que interessa molt per combatre-hi les humitats.
 - Si es fa la rehabilitació de l'edifici, **és un canvi d'afectació mínima** a nivell constructiu i de pressupost de l'obra.
 - Cal preguntar-se, visualitzant els *pathlines* de l'apartat 5.2, que passaria si la **ranura de la porta principal estigués a la part inferior de la mateixa**. De cara a incrementar la circulació i velocitat de l'aire a la planta baixa, on hi ha més problemes d'humitat, seria interessant.
 - Aquestes obertures s'haurien de fer d'alguna manera que no **possessin en joc la salubritat o seguretat dels veïns**. Per exemple amb una reixeta gruixuda d'acer.

✓ **La coberta solar és una bona idea.**

- És evident que l'escalfament irradiació solar afecta positivament al moviment general d'aire i que la convecció natural es produeix, quan fa sol.
- El color del material és important, ja que un color fosc reflectiria menys irradiació i ajudaria escalfar més la coberta. Cal tenir en compte l'efecte que això pot tenir a les condicions de temperatura a l'interior de l'escala de veïns
- Es podria estudiar els casos amb un material de una millor conductivitat tèrmica o millors propietats radiants.
- Si es fa la rehabilitació de l'edifici, **és un canvi d'afectació mínima** a nivell constructiu i de pressupost de l'obra.

Planificació

A continuació es mostra un diagrama de Gantt amb la planificació de les fases del projecte.



Il·lustració 55. Diagrama de Gantt del projecte.

Cost

La realització d'aquest projecte en un entorn professional (i no acadèmic) tindria 2 tipus de costs:

- **Mà d'obra:** Les hores invertides en reunions, investigació, elaboració del model, execució de les simulacions i redacció d'aquesta memòria. Suposarem un preu per hora de 25€/h (sense IVA), un preu estàndard si contractéssim un treballador autònom.
- **Cost de les eines:** Sense tenir en compte el cost dels ordinadors utilitzats, els programaris que s'han fet servir per dissenyar el model i realitzar els càlculs eren en ambdós casos versions d'estudiant. La llicència anual d'aquests són més aviat cares i depenen molt de com s'adquireixin i en quin moment. Estimarem d'uns 30.000€/any (IVA no inclòs) per l'entorn ANSYS i uns 5.000€/any (IVA no inclòs) pel SolidWorks. No ha entrat dins l'abast d'aquest projecte la realització de plànols en AutoCAD, així que no ho tindrem en compte.

A la Il·lustració 55 es pot veure com el projecte ha tingut una durada estimada de 27 setmanes, dividides en fases de diferent durada. Les hores per setmana de mà d'obra s'estimen en 10 hores/setmana per les fases 1 i 2 (fins la setmana 18) i 20 hores/setmana a partir del començament de la fase 3 (9 setmanes més). Sumen 360 hores.

27 setmanes són un 51,89% d'un any, es calcula aquest % del cost de cada llicència.

Taula 3. Cost total de l'estudi.

Concepte	Cost unitari (€)	Unitats	Total sense IVA (€)	TOTAL (€)
Hores de mà d'obra	25,00	360,00	9000,00	10890,00
Llicència ANSYS	30000,00	0,52	15567,00	45567,52
Llicència SW	5000,00	0,52	2594,50	7595,02
TOTAL				64052,54

El cost total de l'estudi es calcula a la **Error! No s'ha trobat l'origen de la referència.** i és de 64.052,54€, IVA inclòs.

Impacte ambiental

L'impacte ambiental d'aquest projecte deriva únicament de l'energia consumida pels ordinadors necessaris per realitzar-lo, en cas que aquesta no provingui de fonts d'energia renovables.

Per tal de valorar quin impacte ha tingut, es convertiran els kWh consumits pels ordinadors de treball a Kg de CO₂ en Kwh. S'utilitzarà la mitjana estatal que calcula la *Comisión Nacional del Mercado de Valores*, de 0,15 kg de CO₂ per Kwh.

Tal i com s'ha comentat abans, aquest projecte ha requerit d'un ordinador computacional per fer les simulacions, el qual té una potència de 200 W. L'ordinador personal en el que s'han fet feines més senzilles de modelat, mallat o escriure aquesta memòria té una potència d'uns 40W.

Per les hores de treball de l'ordinador de les simulacions, hem estimat unes 5 hores per simulació i que s'han efectuat un total de 12 (un parell per a cada cas, per tenir en compte errors realitzats). També s'ha utilitzat l'ordinador computacional per realitzar altres operacions, unes 30 hores. En total s'ha utilitzat unes 90 hores.

L'ordinador personal s'estima que s'ha utilitzat unes 300 hores, ja que unes altres 30 de la mà d'obra s'han passat en reunions i trucades.

Si es multiplica la potència dels ordinadors per les hores de treball, s'obtidran els kWh consumits al llarg del projecte, els quals es poden convertir a Kg de CO₂ emesos. A la Taula 4 es mostren els càlculs de Kg de CO₂ emesos al llarg del projecte.

Taula 4. Emisions de CO₂ conseqüència de l'estudi.

	Potència (W)	Hores d'ús	Consum (Kwh)	Kg de CO ₂
Ordinador personal	40	330	13,20	1,98
Ordinador computacional	200	90,00	18,00	2,70
TOTAL				4,68

Per tant, es considera que al llarg d'aquest projecte s'han emès 4,68 Kg de CO₂. Cal remarcar que, com s'ha comentat anteriorment, l'impacte ambiental del projecte quedaria altament reduït si la font d'energia elèctrica fos renovable, per exemple si el subministrament energètic estigués contractat amb una comercialitzadora que només subministrés energia lliure d'emissions.

Agraïments

Al professor Alfredo Guardo per la seva paciència i naturalitat, que m'han permès aprendre molt més del que hagués pogut imaginar amb un TFG.

A l'equip d'arquitectes d'Oasiurbà, per la seva ajuda amb el projecte. També tota la gent de l'entitat que he conegut i en especial la Victòria Tous i l'Ivo Recoder pel que m'han aguantat.

A la Laia Tort.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] Ajuntament de Barcelona | Oficina Municipal de Dades | Evolució del nivell freàtic 2010. [<https://www.bcn.cat/estadistica/catala/dades/anuaris/anuari11/cap01/C0103070.htm>, 13 d'abril de 2021]
- [2] UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA. Escola Tècnica Superior d'Arquitectura del Vallès. *Vocabulari de Construcció Arquitectònica, Temperatura i humitat a l'edificació*. [<http://tecno.upc.edu/bt/Vocabulari/Vocabulari05.htm>, accés el 13 de abril de 2021].
- [3] PITTAU, ROBERTO. *Física de los procesos biológicos, capítulo 5*. [<https://www.ugr.es/~pittau/FISBIO/t5.pdf>, accés el 10 d'abril de 2021].
- [4] ARUNDEL, A. V., ET AL. *Indirect health effects of relative humidity in indoor environments* Environmental Health Perspectives, vol. 65, març de 1986, pp. 351-61.
- [5] CENGEL, YUNUS A. *Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico*. McGraw-Hill, 2007.
- [6] MINISTERIO DE HACIENDA. SEDE ELECTRÓNICA DEL CATASTRO. [<https://www1.sedecatastro.gob.es>]
- [7] EPSEM (UPC). *Transferència de matèria. Fonaments teòrics*. [<http://epsem.upc.edu/~transferenciademateria/fonaments%20materia.html>]
- [8] OLIVES VERGER, BORJA. *Estudi energètic d'un habitatge en risc d'exclusió social al barri del Raval*, TFG, gener 2019.
- [9] GAMEZ ALCALA, LUIS ENRIQUE. *Desarrollo de un modelo computacional CFD para el estudio de una vivienda en riesgo de exclusión social*. TFG, Juny 2020.
- [10] CNMC - COMISIÓN NACIONAL DE LOS MERCADOS Y LA COMPETENCIA. *Listado de Informes de Etiquetado de Electricidad, año 2020*. [<https://gdo.cnmc.es/CNE/resumenGdo.do?anio=2020>, Accés 21 de abril de 2021].

Bibliografia complementària

- [11] EdX | CornellX. «A Hands-on Introduction to Engineering Simulations». Curs, mòduls 4 i 5. [<https://www.edx.org/course/a-hands-on-introduction-to-engineering-simulations>].
- [12] Canal de YouTube d'ANSYS. *ANSYS Fluent: Basic Post-processing*. [https://www.youtube.com/watch?v=B_DZH8dWSAk, accés el 16 d'octubre de 2020].
- [13] ANSYS. *Fluent 2020 R2 User Guide*. [https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v202/en/flu_ug/flu_ug.html]
- [14] ANSYS. *ANSYS Fluent Tutorial Guide (Release 2020R2)*. Juliol, 2020.
- [15] ANSYS. *ANSYS Fluent Workbench Tutorial Guide (Release 2020R2)*. Juliol, 2020.