

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Mecànica

Títol: Sistema alternatiu d'aerodinàmica activa aplicada a l'automoció.

Document: Memòria

Alumne: Iu Rubau Causa

Tutor: Eduard Massaguer Colomer / Albert Massaguer Colomer

Departament: Enginyeria Fluidomecànica

Àrea: Aerodinàmica

Convocatòria (mes/any): juny 2024

ÍNDEX

1. INTRODUCCIÓ.....	3
1.1 ANTECEDENTS.....	3
1.2 OBJECTIUS.....	3
1.3 ABAST.....	3
2. OPTIMITZACIÓ DE L'AERODINÀMICA AUTOMOBILÍSTICA.....	4
2.1 CONCEPTES AL VOLTANT DE L'ESTUDI.....	4
2.1.1 EFECTE MAGNUS.....	5
2.2 IMPORTÀNCIA DE LA CÀRREGA I LA RESISTÈNCIA AERODINÀMICA....	6
2.3 OPTIMITZACIÓ DE L'AERODINÀMICA DE VEHICLES.....	7
2.3.1 FONS PLA I DIFUSOR.....	7
2.3.2 DRAG REDUCTION SYSTEM (DRS).....	8
2.3.3 ALETES.....	9
2.3.4 PERFORACIONS SUPERFICIALS.....	10
2.3.5 LLANTES AERODINÀMIQUES.....	11
2.4 LIMITACIONS I INCONVENIENTS DELS SISTEMES ACTUALS.....	11
2.5 OPORTUNITATS PER A MILLORES I NOVES TECNOLOGIES.....	12
3. DESENVOLUPAMENT CONCEPTUAL DEL SISTEMA.....	13
3.1 METODOLOGIA.....	13
3.2 CONCEPTE I PRINCIPI DE FUNCIONAMENT.....	13
3.2.1 PRECEDENTS.....	15
3.3 DISSENY DEL SISTEMA I PROPOSTES.....	16
4. SIMULACIÓ DEL SISTEMA.....	19
4.1 CONDICIONS DE CONTORN.....	19
4.2 VALIDACIÓ DE LES SIMULACIONS.....	19
4.3 COMPARACIÓ DE RESULTATS.....	20
4.3.1 SIMULACIÓ CAS AÏLLAT.....	21
5. CONCLUSIONS.....	23
5.1 CONCLUSIONS DE LA SIMULACIÓ.....	23
5.2 CONCLUSIONS DE L'ESTUDI.....	24
5.3 FUTURES INVESTIGACIONS.....	24
6. BIBLIOGRAFIA.....	26
7. RELACIÓ DE DOCUMENTS.....	29

A. ANNEX A: CÀLCULS.....	30
A.1 CÀLCULS PREVIS A LES SIMULACIONS.....	31
A.2 CÀLCULS POSTERIORIS A LES SIMULACIONS.....	32
B. SIMULACIÓ DEL SISTEMA.....	34
B.1 PROCEDIMENT.....	35
B.1.1 GEOMETRIA.....	35
B.1.2 MALLAT.....	36
B.1.3 CONFIGURACIÓ DE LA SIMULACIÓ.....	39
B.1.4 RESULTATS.....	41
B.2 SÍNTESI DE DADES.....	49

1. Introducció

1.1 ANTECEDENTS

Es busca desenvolupar un nou element aerodinàmic mòbil en l'àmbit automobilístic. Anteriorment en el món de l'aerodinàmica activa a l'automoció el sistema que s'ha aplicat amb major influència és *el Drag Reduction System*, sistema basat en un aleró que modifica l'angle de l'ala amb l'objectiu de reduir la força d'arrastrament associada a l'aleró. Pel que fa a l'aplicació de l'efecte Magnus, l'àmbit en el qual s'ha experimentat més és el naval amb els rotors Flettner.

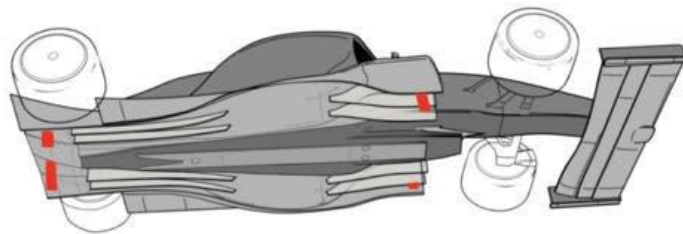


Figura 1: Esbós de possible proposta (Font pròpia)

1.2 OBJECTIUS

L'objectiu d'aquest treball recau en analitzar el rendiment i contribució d'un nou sistema automobilístic d'aerodinàmica activa (mòbil) en el pas d'un vehicle per un revolt. Dit sistema farà ús de l'efecte Magnus com a principi de funcionament.

1.3 ABAST

L'abast d'aquest treball serà el següent: primerament contempla una part de recerca profunda i exhaustiva analitzant els actuals sistemes emprats en el món de l'automoció així com una recerca sobre l'efecte Magnus; a continuació es dissenyarà un sistema d'aerodinàmica activa amb l'objectiu de veure la capacitat del sistema en millorar l'aspecte aerodinàmic; en tercer lloc, s'analitzaran els resultats; i finalment s'extrauran les conclusions.

2. Optimització de l'aerodinàmica automobilística

2.1 CONCEPTES AL VOLTANT DE L'ESTUDI

L'aerodinàmica és la branca de la fluidomecànica que estudia el comportament de l'aire vers elements, en el cas que ens ocupa, els vehicles. Per la seva comprensió es començarà per l'explicació de diferents conceptes que l'envolten.

- Flux d'aire: El flux d'aire és el volum d'aire que travessa un obstacle fet pel qual fa que l'aire es comporti com un fluid.
- Capa límit: La capa límit és la làmina de flux d'aire en contacte amb la superfície de l'element el qual travessa el fluid.
- Càrrega aerodinàmica: La càrrega aerodinàmica és la força vertical generada pel flux d'aire quan impacta l'element d'estudi, si és descendent es diu "downforce" i si és ascendent es diu sustentació o "lift".
- Resistència aerodinàmica: La resistència aerodinàmica és la força que s'oposa al moviment de l'element quan travessa el fluid.

A continuació, s'aprofundirà més en principi físics i fenòmens que envolten aquest camp d'estudi:

- Principi de Bernoulli: el principi que ens permet interpretar i quantificar com amb la variació de velocitat s'incrementa o disminueix la pressió. Aquest principi està regit per la fórmula bàsica de la dinàmica de fluids (equació de Bernoulli):

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2 \quad (\text{eq.1})$$

Aquesta fórmula ens permet comparar un fluid de densitat constant en dues situacions diferents, en el cas que ens ocupa, el factor h (altura) serà també constant.

2.1.1 Efecte Magnus

Fenomen físic que es produeix quan un element en rotació travessa un fluid. Aquest fet comporta una diferència de velocitats a banda i banda que deriva en una diferència de pressions (eq. 1) creant així una força perpendicular al moviment de l'element anomenada força Magnus (F_m).

Principalment, aquest fenomen és conegut pel seu ús a esports com el futbol o el beisbol on es recolza en aquest efecte per tal de fer traçar a la bola o pilota una trajectòria curvilínia. En l'àmbit tecnològic, el sistema més popular que empra aquest fenomen és el rotor Flettner, un cilindre vertical llis principalment usat per reduir el consum de vaixells.

La fórmula per quantificar la força Magnus varia molt segons la forma i rugositat de la superfície de l'element rotatiu, les diferents expressions per obtenir la força resultant parteixen de la forma cilíndrica del rotor Flettner. L'expressió general és la següent:

$$F_m = V \times \rho \times (2 \pi r)^2 \times \omega \times L \quad (\text{eq. 2})$$

Així doncs, es té en compte les variables: velocitat del flux d'aire (V), densitat de l'aire (ρ), radi del cilindre (r), velocitat angular de l'element rotatiu (ω) i longitud del cilindre (L).

2.2 IMPORTÀNCIA DE LA CÀRREGA I LA RESISTÈNCIA AERODINÀMICA

En l'àmbit de l'automobilisme de competició tant la càrrega (o *downforce*) com la resistència aerodinàmica (o *drag*) tenen un paper molt important, ja que una bona configuració d'elements aerodinàmics permet l'optimització d'aquests dos valors.

Per entendre aquests dos fenòmens s'ha d'entendre els factors que hi intervenen en el seu càlcul així doncs disposem de les següents equacions per quantificar les corresponents forces:

- Càrrega aerodinàmica (F_d): aquest fenomen està regit per la següent equació:

$$F_d = C_l \times \frac{1}{2} \rho \times v^2 \times S \quad (\text{eq. 3})$$

On s'involucra el coeficient de sustentació (C_l), la densitat del fluid que es travessa (ρ), la velocitat de l'element d'estudi (v) i l'àrea frontal (S).

- Resistència aerodinàmica (F_r): aquest fenomen està regit per la següent equació:

$$F_r = C_d \times \frac{1}{2} \rho \times v^2 \times S \quad (\text{eq. 4})$$

On s'involucra el coeficient de resistència aerodinàmica (C_d), la densitat del fluid que es travessa (ρ), la velocitat de l'element d'estudi (v) i l'àrea frontal (S).

La càrrega aerodinàmica aporta una força que pressiona el vehicle contra el terra proporcionant així una major adherència a les rodes en el seu pas per un revolt, fet que permet una major velocitat. La forma més comuna d'augmentar aquesta càrrega aerodinàmica sol ser amb alerons (figura 1).

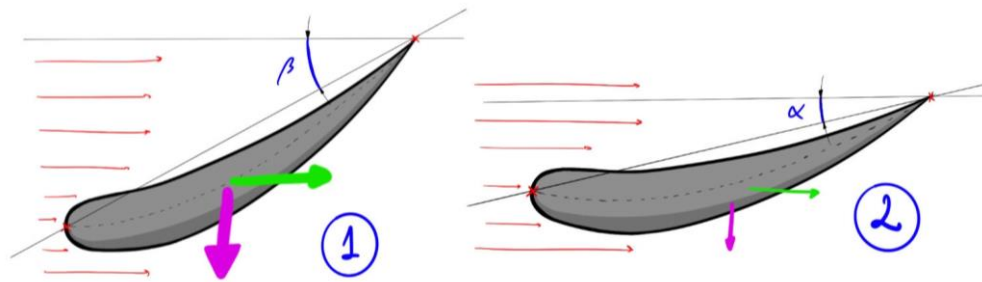


Figura 2: Representació de les forces de càrrega (lila) i de resistència aerodinàmica (verd) (Font pròpia)

El fet d'incrementar l'angle d'atac de l'aleró aporta una major càrrega aerodinàmica, però, per contra, augmenta la superfície frontal (eq. 4) engrandint així la resistència aerodinàmica. Per tant, com es pot apreciar a la figura 1 amb un major angle d'atac ($\beta > \alpha$) augmenta la càrrega i la resistència aerodinàmica, és a dir ambdues forces de la situació 1 seran superiors a les de la situació 2.

La resistència aerodinàmica la major part de les vegades és una força col·lateral i paràsita (a excepció del seu ús com a fre aerodinàmic) i augmentar-la és un inconvenient, ja que a l'oposar-se al moviment del vehicle limita la velocitat màxima (requerint major potència per superar-la) i augmenta el consum d'energia necessària per realitzar el mateix desplaçament a la mateixa velocitat.

2.3 OPTIMITZACIÓ DE L'AERODINÀMICA DE VEHICLES

Anteriorment, s'ha demostrat la importància d'un bon balanç dels valors de càrrega i resistència aerodinàmica. Així doncs, actualment hi ha diferents sistemes per l'optimització d'aquests dos valors.

2.3.1 Difusor i fons pla

El funcionament del fons pla es basa en un estrènyer el flux d'aire que passa per sota del vehicle per tal d'augmentar la velocitat en la zona de depressió, disminuint la pressió (eq. 1) creant així una força de succió vers el terra. Al final del fons pla s'hi adhereix el difusor per tal de fer en còmput global la forma d'ala invertida per així accentuar el seu efecte. Amb aquest sistema s'augmenta la càrrega aerodinàmica tot disminuint la resistència. (figura 2)

Per tal d'hermetitzar la zona de depressió es fa ús dels àmpliament coneguts faldons, que són unes planxes verticals que es col·loquen als costats del vehicle per tal de canalitzar més l'aire que hi passa i augmentar l'eficiència del sistema.

Pel que fa als difusors, sobretot en l'alta competició s'ha experimentat amb conceptes com el "doble difusor" (inventat per l'equip de la fórmula 1 Brawn GP l'any 2009), que en essència és un difusor que separa fluxos d'aire que provenen d'entrades diferents. També s'ha experimentat amb difusors bufats (dissenyat per l'escuderia de fórmula 1 Renault l'any 1983), és a dir difusors que aprofiten els gasos d'escapament per augmentar la càrrega.

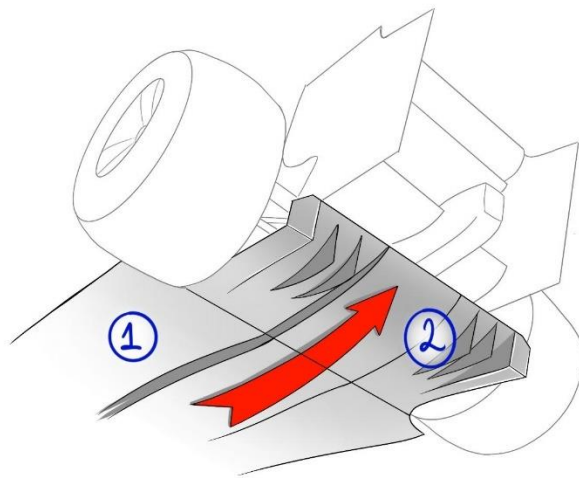


Figura 3: Fons pla (1) i difusor (2) (font pròpia)

2.3.2 Drag Reduction System (DRS)

En català sistema de reducció de la resistència aerodinàmica, és un sistema d'aerodinàmica activa que varia mecànicament l'angle d'atac de l'aleró per tal de reduir o augmentar la càrrega aerodinàmica segons es requereixi. Es disposaria de la dualitat de situacions de la figura 1. D'aquesta forma es pot reduir la resistència en trajectes rectes i augmentar la càrrega aerodinàmica en trams de revolts optimitzant així el consum d'energia tot incrementant la velocitat límit en trajectòries curvilínies. És un sistema que s'ha donat a conèixer per la Fórmula 1, ara bé, un gran exemple que ha continuat amb el seu desenvolupament és el cas dels alerons direccionals, l'objectiu d'aquests és contrarestar la força centrífuga en un revolt i ho fan desplegant alerons antisimètrics (com és el cas del Pagani Huayra) o bé inclinant l'aleró segons les condicions requereixin (com és el cas del Zenvo TSR-S). Com es pot apreciar a la

figura 3 l'aleró està inclinat cap endavant per augmentar l'angle d'atac i inclinat lateralment per contrarestar la força centrífuga.



Figura 4: Aleró direccional Zenvo TSR-S (Font: <https://www.autolimite.com/>)

2.3.3 Aletes

Les aletes dirigeixen el flux d'aire, reduint així les turbulències que es creen, per tal de disminuir la resistència aerodinàmica. Aquesta tecnologia és àmpliament emprada a l'àmbit aeronaval, un bon exemple d'aplicació d'aquesta tecnologia a l'àmbit automobilístic és el cas del Koenigsegg Jesko Absolut (figura 4).



Figura 5: Aletes Koenigsegg Jesko Absolut (<https://www.koenigsegg.com/model/jesko-absolut>)

2.3.4 Perforacions superficials

El fet d'afegir perforacions a la superfície del vehicle ajuda a reduir la resistència aerodinàmica, ja que crea una capa límit turbulenta fet que crea un despreniment més retardat i evita augmentar la secció efectiva, o en altres paraules, redueix l'estela que crea l'element (fet que disminueix la resistència). Aquest fenomen és el motiu pel qual les pilotes de golf tenen petites cavitats a la seva superfície (figura 5). Un clar exemple d'aplicació d'aquest fenomen en l'àmbit de l'automobilisme és el "Lamborghini Sesto Elemento" emprant perforacions hexagonals, les més efectives (figura 6).

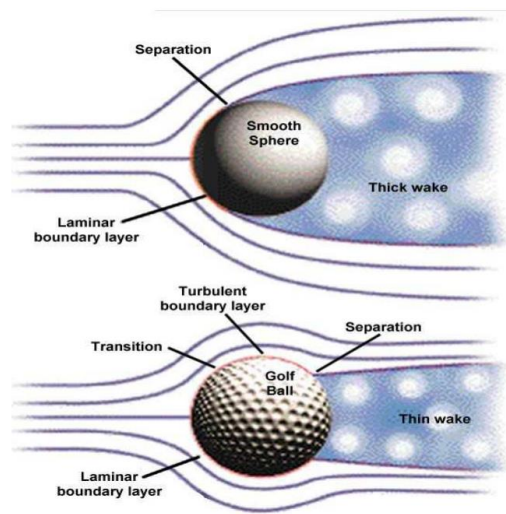


Figura 6: Despreniment de la capa límit (Font: <https://www.todayifoundout.com/>)



Figura 7: Perforacions hexagonals Lamborghini Sesto Elemento (Font: <https://www.lamborghini.com/>)

2.3.5 Llantes aerodinàmiques

A part de funció estètica i estructural, les llantes poden ajudar a millorar l'eficiència aerodinàmica del conjunt, reduint la resistència. En casos com el del ciclisme, si comparem entre llantes aerodinàmiques vers les convencionals, es pot arribar a millorar l'eficiència en un 25%. En l'àmbit automobilístic és un bon exemple les "Aero Wheels" de Tesla (figura 7), ja que incrementen fins a un 3% l'autonomia del vehicle.



Figura 8: Aero Wheels de Tesla (Font: <https://www.caranddriver.com/>)

2.4 LIMITACIONS I INCONVENIENTS DELS SISTEMES ACTUALS

En l'apartat anterior s'han mencionat diferents sistemes per aprofitar l'aerodinàmica amb l'objectiu de millorar l'eficiència de l'automòbil, tot i això, a continuació es mencionaran les principals limitacions i inconvenients dels sistemes més comuns.

El sistema de fons pla i difusor té un gran inconvenient en el seu ús fora de circuit o en circuits amb irregularitats en el terreny i és que en cas de passar per un ressalt es corre el risc de perdre el mencionat hermetisme del fons pla amb el qual es redueix dràsticament la capacitat de succió d'aquest fet que pot comportar a una conducció imprevisible.

Pel que fa als alerons estàtics tenen el problema de la resistència aerodinàmica, a major càrrega major és la resistència i per tant major és el consum d'energia (combustible, electricitat, etc.).

D'altra banda, els sistemes d'alerons dinàmics, sobretot els direccionals tenen la problemàtica del canvi de pesos, és a dir, el fet de tenir l'aleró direccional a la zona final del cotxe fa que en un revolt distribueixi més pes a la roda posterior de l'interior del revolt, aquest fet porta implícit reduir la distribució de pes a la roda davantera de l'exterior del revolt que és precisament la que té una major contribució a contrarestar la força centrífuga. Dit amb altres paraules, se li afegeix més contribució a la posterior interior traient-li a la davantera exterior. Per tant, el principal inconvenient d'aquests sistemes és que depenen de l'adherència del pneumàtic i del terreny per on es desplaça, és a dir, factors externs al sistema aerodinàmic (inconvenient que es comparteix amb els sistemes de fons pla).

Per contrastar el tema anterior, l'objectiu de la majoria dels sistemes és proporcionar una major tracció als pneumàtics augmentant els esforços als quals se sotmeten, fet que propícia al seu desgast.

Finalment, cal mencionar que el fet d'augmentar el pes recolzat sobre els pneumàtics fa augmentar el coeficient de rodadura, que s'acaba traduïnt en un major consum d'energia per realitzar el mateix desplaçament.

2.5 OPORTUNITATS PER A MILLORES I NOVES TECNOLOGIES

Per tots els inconvenients mencionats, indirectament donen un especial atractiu a desenvolupar sistemes aerodinàmics centrats a contrarestar les forces centrífugues, ja que d'aquesta forma es redueix el desgast dels pneumàtics i la dependència dels sistemes aerodinàmics als propis pneumàtics o els anteriorment citats factors externs.

3. Desenvolupament conceptual del sistema

3.1 Metodologia

Per a dur a terme l'estudi inicialment es plantejarà el concepte i principi de funcionament del sistema tot seguit de l'anàlisi de sistemes anteriors que segueixen el mateix principi de funcionament. A continuació es presentaran tres propostes de disseny que posteriorment seran assajades en unes condicions d'entorn definides per tal de treure uns resultats comparables entre propostes. D'aquests resultats s'obtindrà unes conclusions que determinaran la viabilitat funcional del sistema.

3.2 Concepte i principi de funcionament

Es planteja un sistema d'aerodinàmica activa direccional seguint el principi de l'efecte Magnus.

Aquest sistema tractarà d'un o més elements dinàmics situats en punts d'alt flux d'aire, per tal d'augmentar el seu efecte, que giraran sobre el seu propi eix (figura 8) per crear la rotació (w) perpendicular a la direcció del flux (efecte Magnus) amb l'objectiu d'aprofitar la força resultant per contrarestar la centrífuga millorant així el repartiment de pesos del vehicle en un revolt.

Es determinarà el sentit i règim de gir del sistema en funció del grau de gir del volant del vehicle, en cas d'estar traçant una trajectòria rectilínia ($w=0$ rad/s) i en cas d'estar traçant una trajectòria curvilínia, és a dir el grau de gir del volant diferent de zero ($w>0$ rad/s).

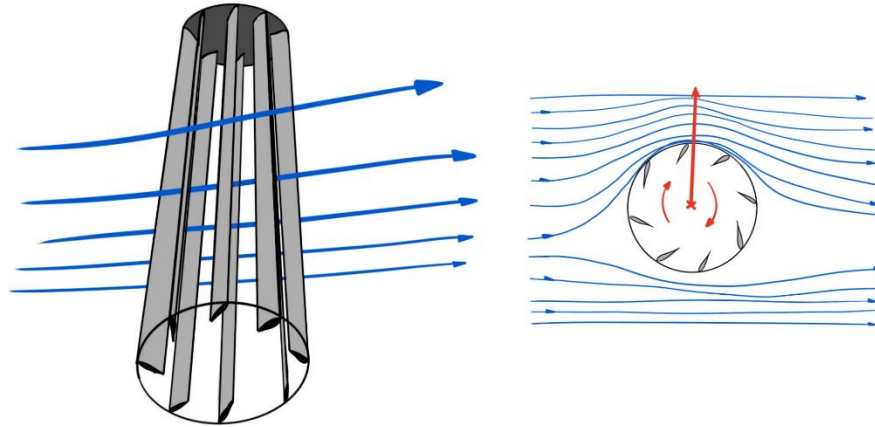


Figura 9: Concepte inicial del sistema (font pròpia)

En un inici aquest sistema pretén reduir el desgast de pneumàtics, ja que la contribució de cada un al repartiment de pesos seria més equitativa (per tant, menys agressiva) i no requeriria tanta “downforce”, el que comporta a un menor desgast per rodadura.

Reduint la càrrega necessària es reduiria la resistència aerodinàmica, motiu principal pel qual es reduiria el consum d'energia necessària pel seu desplaçament. El motiu secundari és per la reducció del coeficient de rodadura que indirectament també repercuteix al consum.

Aquest sistema és independent als factors externs, com són els pneumàtics o l'adherència d'aquests en el terreny en qüestió, ja que no se centra a augmentar l'adherència sinó en aportar força al vehicle per contrarestar la centrífuga.

Finalment, s'espera que l'aportació de resistència aerodinàmica sigui mínima, perquè en un inici la proposta no segueix el concepte dels rotors Flettner (cilindres llisos), la proposta planteja un conjunt d'aleps amb perfil d'ala col·locats en forma cilíndrica que l'aire pugui córrer per dins en cas que el sistema no estigui rotant (esquerra figura 8).

3.2.1 Precedents

Anteriorment en els àmbits navals i aeronavals ja s'han emprat tecnologies que segueixen el mateix principi del sistema en qüestió, és a dir, emprar l'efecte Magnus per tal d'aprofitar la força resultant.

És el cas dels rotors Flettner (figura 9), cilindres que se situen verticalment en els vaixells per tal de facilitar l'avenç de l'embarcació quan el vent impacta lateralment. Aquest sistema actua de complement a la força motriu tradicional dels vaixells i ajuda a reduir el consum d'energia fins a un 20%. L'origen d'aquests rotors se situa el 1922 (tecnologia inventada per Anton Flettner) i es va aplicar per primera vegada al vaixell Bukau (1924).



Figura 10: Funcionament del rotor Flettner (Font: <https://www.youtube.com/@marineinsight>)

Més endavant, el 1930 tres inventors americans van fer volar l'hidroavió "Plymouth A-A-2004" (figura 10) a Long Island Sound, que disposava de dos rotors Flettners concèntrics i paral·lels a l'aigua que permetien generar la sustentació per elevar l'aeronau. La força d'avenç de l'avioneta era deguda a l'hèlix de tres àleps situada a la part davantera del casc.

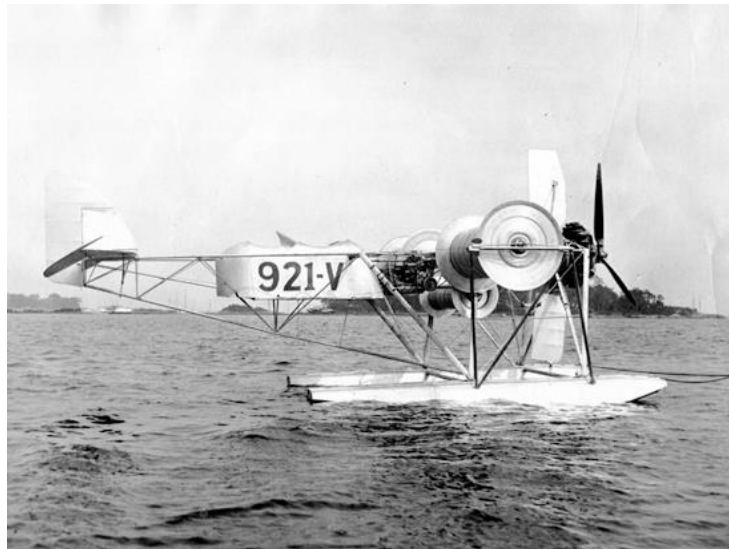


Figura 11: Hidroavió amb rotors Flettner (Font: <https://www.researchgate.net/>)

L'any següent, 1931 Isaac C. Popper va desenvolupar i construir una aeronau que funcionava amb quatre rotors de formes còniques (dos per banda) i assegurava que vers el model d'ala convencional, aquests sistemes disposaven del doble de la capacitat de sustentació i podien aterrar a la meitat de velocitat, de totes maneres no hi ha dades registrades sobre les proves realitzades.

3.3 DISSENY DEL SISTEMA I PROPOSTES

Partint del concepte inicial del rotor Flettner es presentaran tres propostes diferents seguint el concepte cilíndric d'aquest. Les opcions són les següents:

- Rotor llis (figura 11): aquest rotor és el més fidel al rotor Flettner, ja que disposa d'una superfície llisa.
- Rotor no perforat (figura 12): aquesta proposta presenta un estriat a la superfície el qual, en un inici, podria desplaçar més quantitat d'aire accentuant així el seu efecte.
- Rotor perforat (figura 13): aquest últim model està compost per uns àleps amb perfil ala simètric el qual, en un inici; permetria el flux d'aire pel seu interior, disminuint així la resistència aerodinàmica.

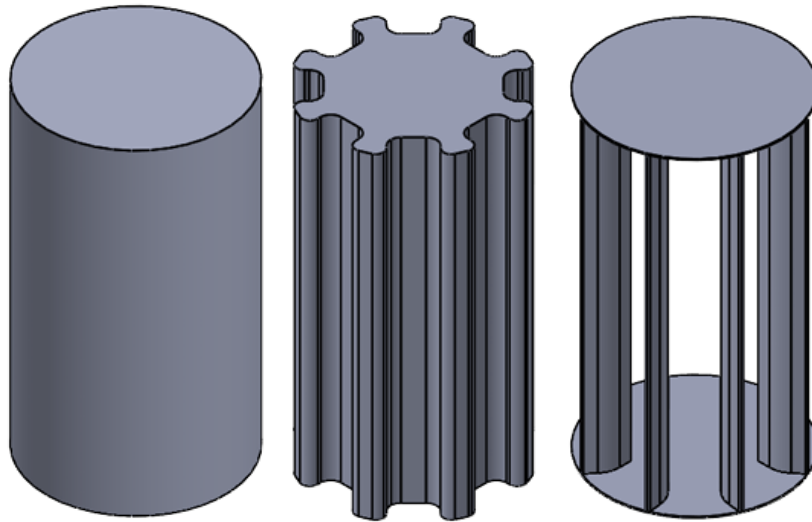


Figura 12, 13 i 14 (respectivament): Propostes rotors (Font: pròpia)

Totes les opcions disposen de les mateixes dimensions generals per fer la comparació equitativa (vegeu document 2, plànols). Per prendre l'ordre de les dites dimensions s'ha pres de referència aproximativa una ampolla d'un litre d'aigua estàndard, ja que aquesta està dotada d'unes dimensions que podrien cabre sense gaires complicacions al fons pla d'un vehicle de competició, aquest mateix raonament es prendrà més endavant en el dimensionat del volum de control de les simulacions.

Per l'anàlisi de resultats es considerarà la implementació de quatre rotors al fons pla del vehicle i propers a les rodes, descarregant així aquestes dels esforços a les quals estan sotmeses en un revolt. Es considera la ubicació en el fons pla, ja que és una zona d'alt flux d'aire i no afectaria l'estètica del vehicle. A continuació es mostra una imatge de com podrien estar ubicats dits rotors en el fons pla d'un vehicle de fórmula 1 de la generació del 2022.

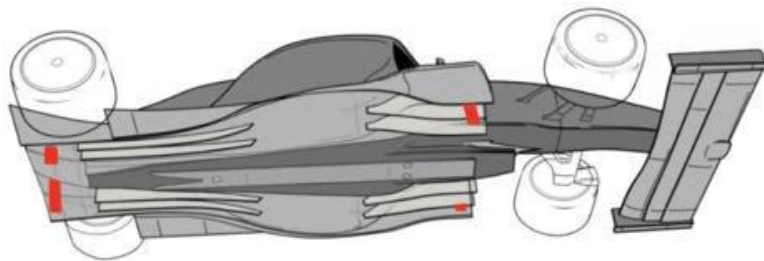


Figura 15: Ubicació rotors al fons pla d'un vehicle (font pròpia)

De totes maneres s'hauria de comprovar el funcionament òptim segons cada vehicle depenent de l'estil de fons pla o en cas de situar-los a la carrosseria fer un estudi dels punts més eficients.

4. Simulació del sistema

4.1 Condicions de contorn

Per determinar les condicions de contorn a les quals s'estudiarà el sistema s'ha pres de referència el traçat del vehicle Ferrari 430 Scuderia en el seu pas pel revolt 11 (radi de 50 m) del Circuit de Catalunya a una velocitat mitjana de 25 m/s. El vehicle (amb una massa de 1525 kg) no disposa d'aleró ni sistemes d'aerodinàmica activa, per tant, tota la força lateral que s'aconsegueixi es descarregarà dels pneumàtics.

Es plantejaran tres velocitats de gir dels rotors 2000 rpm, 10000 rpm i 20000 rpm. Dits rotors estaran tancats en un flux d'aire delimitat per unes parets que es desplacen a la mateixa velocitat que el flux que el travessa. A l'annex B es demostra gràficament la irrellevància d'aquest detall, fet que únicament complica el processament de la simulació.

4.2 Validació de les simulacions

Per confirmar la veracitat de les simulacions, s'ha de tenir en compte el valor Y_{plus} , ja que aquest ens verifica que els punts d'alt interès d'estudi (punts turbulents) estiguin prou dotats de nodes que puguin recaptar la informació, és a dir compara la velocitat de l'aire amb l'alçada del mallat per tal de tenir un bon balanç.

Per al càlcul d'aquest valor es pren la mitjana de tots els punts de la superfície frontal del rotor obtenint així un valor Y_{plus} mitjà de la superfície d'interès, ja que a la part posterior sempre hi haurà una alta turbulència que no és del nostre interès.

Per obtenir un bon valor Y_{plus} s'ha de trobar l'equilibri correcte entre el màxim de capes (*maximum layers*) i la ràtio de creixement (*growth rate*), ambdós paràmetres formen part del mallat *inflation* (a l'annex B es pot observar l'evolució del dit valor modificant els dos paràmetres mencionats anteriorment). El valor Y_{plus} (adimensional) ha d'estar o bé al voltant d'1 o dins del rang entre 30 i 300.

Acompanyant el valor Y_{plus} , s'utilitza la relació EVR (Eddy Viscosity Ratio) que aquest ens ajuda a corroborar els punts d'alt interès d'estudi indicant-nos el nivell de turbulència, que aquest es troba amb la relació de la viscositat turbulenta respecte de la viscositat molecular dinàmica. A la figura 15 es pot apreciar el gràfic EVR del rotor llis girant a 20000 rpm:



Figura 16: Eddy Viscosity Ratio del rotor llis a 2010 rad/s (font pròpia)

4.3 Comparativa de resultats

En aquest apartat es compararan els resultats obtinguts de les diferents simulacions obtingudes dels tres rotors mencionats anteriorment. Per consultar els detalls tècnics de les simulacions, referir-se a l'annex B.

La següent taula sintetitza el millor resultat de cada rotor per facilitar la interpretació d'aquests on es mostra tant els diferents valors Y_{plus} com les forces que generen, la resistència aerodinàmica (*drag*) i la força Magnus (*lift*), ambdós resultats en N. El millor resultat de cada rotor és trobat amb la relació *Lift/Drag* més eficient, és a dir la major.

	W(rad/s)	Y_{plus}	DRAG (N)	LIFT (N)	L/D
LLIS	2100	50,4191	5,38233	16,9774	3,154
NO PERFORAT	2100	1,8677	6,72028	2,93618	0,437
PERFORAT	2100	1,20901	4,683275	2,1388875	0,457

Taula 1: comparativa de resultats òptims de cada rotor unitàriament. (font pròpia)

Com es pot apreciar a la taula 1, el rotor més eficient és el llis oferint una força lateral al vehicle 3,2 vegades superior a la força lateral que ofereix aquest sistema. Els altres dos rotors no superen la relació d'1, és a dir la força d'arrastrament és superior a la força lateral que poden oferir.

Considerant que se situen quatre unitats de rotors el vehicle rep 67,91 N de força lateral amb els rotors llisos girant a 2100 rad/s (aprox. 20000 rpm). De la força total lateral, el sistema suposaria una descàrrega dels pneumàtics de 0,36% i, per tant, un augment de velocitat en el revolt del 6%.

4.3.1 Simulació cas aïllat

Observant les tendències de les diferents relacions L/D respecte de les velocitats de gir dels rotors (figura 16) s'ha decidit fer un petit estudi d'un cas aïllat en el mateix revolt però considerant la velocitat del vehicle Ferrari F138 (amb una massa de 642 kg), pilotat per Fernando Alonso l'any 2013, traçant el revolt a una velocitat mitjana de 160 km/h. La simulació es durà a terme considerant que el vehicle disposa de quatre rotors llisos amb l'objectiu de saber si seria més significativa la descàrrega d'esforç als pneumàtics.

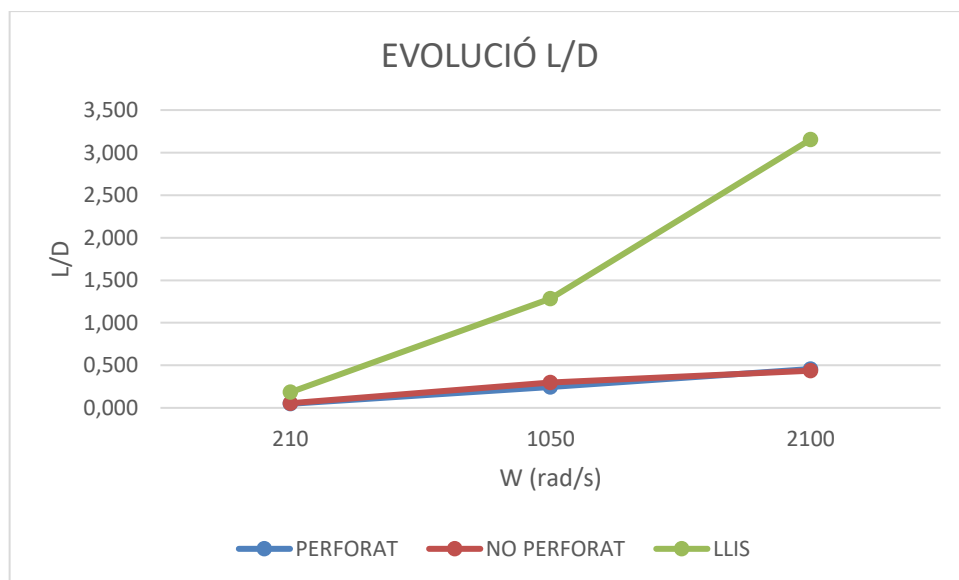


Figura 17: evolució de les relacions L/D dels diferents rotors simulats. (font pròpia)

Es mantenen tots els paràmetres de la simulació del rotor llis, però canviant la velocitat del flux d'aire i s'assaja el rotor a les 3 mateixes velocitats de rotació que a la simulació inicial.

S'obté finalment un resultat de força lateral màxima unitària de 34,4 N (girant a 2100 rad/s). Per tant, en còmput global, el sistema descarrega els pneumàtics un 0,544% de les forces laterals, cosa que permet un augment de velocitat en el pas pel revolt d'un 7,4%. Cal mencionar que la massa és menys de la meitat del vehicle estudiat al cas principal.

5. Conclusions

5.1 Conclusions de la simulació

Com es pot observar a les simulacions realitzades, el rotor més eficient és el rotor llis, resultat previsible en vista del rotor Flettner, ja que és el que més s'hi assimila i el més utilitzat en el món de la tecnologia.

De totes maneres la intuïció podria dir que les dues altres propostes podrien ser més eficients. En el cas del rotor no perforat, les estries suposarien una major capacitat de desplaçament de grans volums d'aire i en el cas del rotor perforat el fet de no ser massís reduiria la força d'arrastrament millorant la mencionada relació L/D.

A la pràctica s'ha vist que no és així, el rotor no perforat, oferint una força *Drag* similar a la del rotor llis, ens aporta una força lateral 7 vegades inferior a la del rotor llis (a un règim de 20000 rpm).

Pel que fa al rotor perforat, si bé la força *Drag* és 1,35 vegades inferior a la del cilindre llis (a un règim de 10000 rpm), la força lateral que pot aportar és gairebé 8 vegades inferior (a un règim de 20000 rpm).

Finalment, les conclusions tècniques que es poden treure són que per norma general el rotor més eficient és el llis pel seu bon balanç de força lateral respecte a la força d'arrastrament així com la gran capacitat (exponencial) de força lateral a major règim de rotació. D'altra banda, el rotor perforat, en un traçat molt recte i on no es necessiti gaire força lateral podria arribar a ser la millor opció per la baixa resistència aerodinàmica.

De totes maneres, el sistema no podria substituir els elements aerodinàmics aplicats a l'actualitat de l'alta competició, o almenys com es planteja, ja que haurien de ser rotors altament sobredimensionats per arribar als 1,5G d'acceleració lateral (assumint-ne 2,5G els pneumàtics). Amb les dimensions plantejades tan sols es podria assumir 0,02G si es considerés sistema únic, en canvi, com a sistema complementari augmentaria la velocitat de pas per revolt al voltant d'uns 12 km/h.

5.2 Conclusions de l'estudi

Quant a l'estudi en general, cal mencionar que és molt conceptual i "poc definit", ja que és un camp molt ampli i en casos concrets hi intervenen moltes variables que aquí no s'han tingut en compte com podria ser la geometria del vehicle com a tal (perquè d'això pot dependre la situació i dimensions dels rotors), el tipus de traçat objectiu i el nivell de millora que es busca.

Els resultats obtinguts en aquesta investigació poden ser positius per casos com els d'un vehicle utilitari on un 0,3% de descàrrega d'esforços laterals en els pneumàtics, a llarg termini, suposa una reducció significativa del desgast d'aquests augmentant mínimament la resistència aerodinàmica (en el rang de velocitats normals d'un utilitari la *Drag* que oposaria el sistema seria insignificant).

També podria ser útil en l'alta competició, on una descàrrega de 0,5% d'esforços laterals del pneumàtic pot suposar una major velocitat en trajectòries curvilínies o bé una millor gestió del degradament del pneumàtic i observant el comportament del sistema, ajustant la geometria, l'emplaçament del sistema i les condicions de funcionament, al llarg de tot un recorregut variat la millora pot ser molt significativa.

5.3 Futures investigacions

En un futur la investigació d'aquest sistema es podria orientar cap a la substitució o complementació dels alerons actuals (tant davanters com de darrere) i comprovar si suposa una millora respecte als sistemes tradicionals, comparant-lo també amb el *Drag Reduction System* (DRS).

De totes maneres també s'hauria de fer recerca d'una energia motriu suficient per fer rotar el sistema al règim determinat tenint en compte els bruscs canvis de sentit de rotació en funció del revolt al qual s'entra.

Deixant de banda el món automobilístic, també es podria provar d'implementar en el món nàutic, buscant l'optimització dels actuals sistemes d'hidrofoil. En tenir més densitat el medi l'efecte incrementaria dràsticament augmentant així la força resultant. Des del punt de vista mediambiental, els rotors podrien proporcionar una força vertical a l'embarcació reduint així la fricció d'aquest i, per tant, el consum de combustible.

D'altra banda, fent més referència a l'Efecte Magnus purament, es podria estudiar i assajar moltes més geometries i superfícies amb el fi d'optimitzar i fer més eficient dit efecte.

En còmput global l'efecte Magnus és molt desconegut i se li poden trobar infinites aplicacions així doncs, hi ha molt camp per recórrer.

6. Bibliografia

[1] Alejandro Saban Fosch, Analisis del flujo de aire a través de un difusor de automóvil, PROJECTE/ Treball fi de grau. Grau en enginyeria d'aeronavegació. Universitat Politècnica de Catalunya. Setembre 2018.

[2] Arnau Chica Bertol, Estudio sobre el método de propulsión mediante rotores Flettner, Treball de fi de carrera. Diplomatura en Navegació Marítima. Facultat de Nàutica de Barcelona. Universitat Politècnica de Barcelona. Juny 2012.

Benjamin Gene Cook, Design Considerations of a Magnus Effect Flettner Rotorcraft, tesis universitària, Liberty University. Abril 2022.

[3] D. I. Greenwell, Aerodynamic characteristics of low-drag bicycle wheels, Cambridge University. Juliol 2016.

[4] Danny García Martín, Estudio de la Capacidad Aerodinámica de Carrocerías de vehículos Categoría CM, Treball fi de grau, Departamento de Proyectos e Ingeniería Rural, Universidad Pública de Navarra. Setembre 2010.

[5] Devang S.Nath, Drag reduction by application of aerodynamic devices in a race car, Department of Mechanical Engineering, Delhi Technological University. Gener 2021.

[6] Hasan Islam Copuroglu, Ocean Engineering, Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Faculty of Marine Sciences, Karadeniz Technical University. Gener 2018.

[7] Joseph Katz, Race car aerodynamics: Designing for speed. Desembre 1995.

[8] Jost Seifert, Project in aerospace sciences, Elsevier. Novembre 2012.

[9] M Lin, P Lewis, P Papadopoulos, Utilising Magnus Effect to Increase Downforce in Motorsport, Athens Journal of Technology. Juny 2023.

- [10] Peter Nuttall, The Magnus Effect and the Flettner Rotor: Potential Application for Future Oceanic Shipping, The Journal of Pacific Studies. Octubre 2016.
- [11] Sadatoshi Taneda, Negative Magnus Effect, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University. Desembre 1957.
- [12] Pàgina web 1: Pàgina oficial de Koenigsegg, informació sobre el model Koenigsegg Jesko Absolut. (<https://www.koenigsegg.com/model/jesko-absolut> , 17 d'abril del 2024).
- [13] Pàgina web 2: Estudi sobre la eficiència de les tapes de llantes "Aero Wheels" del Tesla model 3 (<https://nextmove.de/aero-wheels-from-tesla-reduce-consumption-by-three-percent/> 18 d'abril de 2024).
- [14] Vídeo YouTube 1: Aleró Zenvo:
(https://www.youtube.com/watch?v=vWcnBY3PYfU&ab_channel=OVERDRIVEenEspa%C3%B1ol) 20 d'abril de 2024.
- [15] Vídeo YouTube 2: Rotors Flettner:
(https://www.youtube.com/watch?v=FJt8l80kGTg&t=6s&ab_channel=marineinsight) 24 d'abril de 2024.
- [16] Vídeo de YouTube 3: Simulació 2:
(https://www.youtube.com/watch?v=W1eTcXMSfuk&list=LL&index=1&ab_channel=CFDBABA%2FOPENFOAMANSYSCFD) 15 de maig de 2024
- [17] Vídeo de YouTube 4: Simulació 1:
(https://www.youtube.com/watch?v=biQoLKpmXm0&list=LL&index=2&ab_channel=VinceIntCFD) 15 de maig de 2024
- [18] Vídeo de YouTube 5: Volta Ferrari F430 Scuderia:
(https://www.youtube.com/watch?v=FHid1XPhTHs&t=7s&ab_channel=JosepRodriguezVillarasa) 28 d'abril de 2024

[19] Vídeo de YouTube 6: Volta Fernando Alonso 2013:

(https://www.youtube.com/watch?v=kxjAPlll2AM&ab_channel=DutchRacingFan) 22 de
maig de 2024

7. Relació de documents

[1] Document 0: Resum

[2] Document 1: Memòria

[3] Document 2: Plànols

[4] Document 3: Pressupost

Annex A: Càlculs

En aquest apartat mostraran els càlculs realitzats i que traspassen els resultats de les simulacions a situacions reals o, d'altra banda, ens ajuden a establir les condicions de contorn a les simulacions.

A.1 Càlculs previs a les simulacions

S'inicien els càlculs determinant un lloc d'estudi concret, aquest ha de ser fàcil de determinar i el més constant possible per fidelitzar els valors a la realitat, així doncs s'escull el revolt número 11 del Circuit de Catalunya (el revolt Banc Sabadell), ja que té un radi molt constant. Després de varies proves s'acaba obtenint un radi aproximat del revolt d'uns 50 metres (figura A.1).



Figura A.1: revolt 11 Circuit de Catalunya (font: <https://www.google.es/maps>)

A partir d'aquí queda prendre de referència el mateix vehicle per comparar els diferents models de rotors, així doncs se selecciona el vehicle Ferrari F430 Scuderia on es pot observar que traça dit revolt a una velocitat mitjana d'uns 90 km/h (25 m/s) aquesta mateixa velocitat serà la que es considerarà de flux d'aire que travessa els rotors pel seu estudi.

Una altra dada del cotxe és la seva massa (1525 kg) per tant, ja tenim tots els elements per trobar la força lateral total que rebrà el vehicle i que purament els pneumàtics (ja que no disposa d'elements aerodinàmics significatius) hauran de contrarestar. Per trobar la força lateral total farem ús de la fórmula de l'acceleració centrífuga que és la següent:

$$F = m \times \frac{v^2}{r} \quad (\text{eq. A. 1})$$

On F és la força lateral total del vehicle (N), m és la massa del vehicle (kg), v és la velocitat de l'automòbil (m/s) i r és el radi del revolt (m). Finalment, obtenim una força lateral total de 19.062,5 N que assumeix en la totalitat els pneumàtics.

D'aquesta força total extreta s'analitzarà el percentatge que podrien assumir quatre rotors, es determinen quatre unitats, ja que s'assigna un a cada roda per tal d'evitar la torsió del xassís (aspecte mencionat a l'apartat 2.4) i poder transmetre aquestes forces laterals generades per l'efecte Magnus directament al pneumàtic.

A.2 Càlculs posteriors a les simulacions

Un cop fetes les simulacions es pren la combinació més favorable per calcular l'aportació del sistema (%), en aquest cas és el rotor llis a 2100 rad/s (20000 rpm). A continuació el procediment per obtenir la contribució:

$$\text{contribució} = \frac{4 \times Lift}{F} \times 100 \quad (\text{eq. A. 2})$$

On F és la força lateral total a la qual està sotmesa el vehicle (N), $Lift$ és la força que pot proporcionar el rotor unitàriament (N) i la contribució serà el percentatge de descàrrega que patiran els pneumàtics al llarg del revolt en les condicions establertes (%). S'obté de resultat un 0,35625%.

Es seguirà el mateix procediment per a l'estudi del cas aïllat (apartat 4.3.1) però en les simulacions es canvien les condicions de contorn de 25 m/s de velocitat de flux d'aire a 44 m/s (procés explicat amb més detall en l'annex B, de simulacions).

Per obtenir l'increment de velocitat és un procés similar a l'anterior però revertint les incògnites. A l'equació A.1 s'introdueix com a força lateral el valor de la força generada pels quatre rotors ($4 \times Lift$) i, per tant, sols queda com a incògnita l'increment de velocitat que pot assumir el vehicle gràcies a l'acció del sistema de rotors.

Com a resultats s'obté un increment de velocitat en el cas aïllat d'11,78 km/h i en la combinació de rotors més eficient del cas general (rotor llis a 20000 rpm) un increment de velocitat de 5,37 km/h. Que seguint la següent expressió:

$$\text{percentatge d'augment de velocitat} = \frac{\text{increment de velocitat}}{\text{velocitat inicial}} \times 100 \quad (\text{eq. A.3})$$

Suposen un augment del 7,4% i 6% respecte de les velocitats inicials.

Annex B: Simulacions

B.1 Procediment

En aquest annex es mostrarà el procés que s'ha seguit per tal de realitzar les simulacions juntament amb tots els resultats obtinguts tant gràfics com numèrics. Totes les simulacions han estat realitzades amb el programari Ansys Fluent en la versió d'estudiant.

B.1.1 Geometria

S'inicien les simulacions inserint les geometries predefinides i modelades prèviament amb el Solidworks. És important en aquest pas tenir una coherència amb les unitats que s'utilitzen per evitar incongruències futures.

Realitzat aquest pas es procedeix amb el modelatge de l'*enclosure*, és a dir, delimitar el volum d'aire que s'estudiarà. En aquest pas pren importància el balanç entre un volum prou gran per entrar tots els punts d'alt interès d'estudi i la influència d'aquest tancat en la simulació, a continuació es fa un petit incís detallant aquest últim concepte.

Com més endavant es veurà es pot assignar velocitat a les parets que limiten aquest flux d'aire que per tal de no afectar els càlculs, de fet com es comprova a continuació (figura B.1), considerar les parets estàtiques només complicaria el processament de la simulació. Aquest fenomen queda reflectit als extrems superiors i inferiors del pla representat on es pot apreciar que s'ha considerat que les parets que envolten al rotor tenen una velocitat de 0 m/s (color blau) però ràpidament el gradient retorna a la velocitat objectiva del flux d'aire (25 m/s). De totes maneres, aquest fenomen també es pot menysprear, ja que el diàmetre del rotor és un quart de l'amplada total del tancament en el qual es troba.

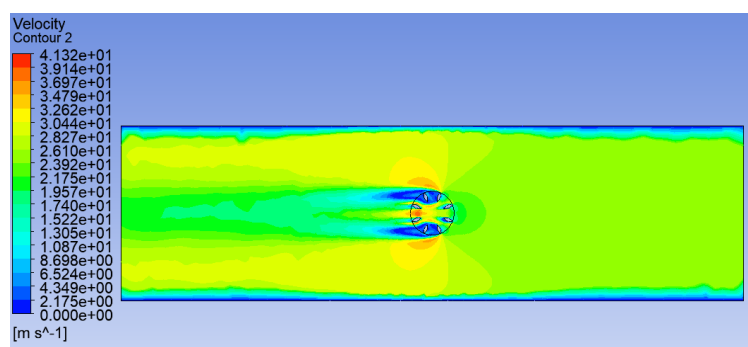


Figura B.1: relació entre la velocitat de les parets i la simulació (font pròpia)

Reprement la importància de l'*enclosure*, és clau prendre el volum mínim per tal de no sobrecarregar d'informació innecessària la simulació i, per tant, dificultar el seu processat. Finalment, s'han pres unes dimensions d'*enclosure*, per tots els rotors, de 1000, 125 i 280 mm (X, Y i Z respectivament).

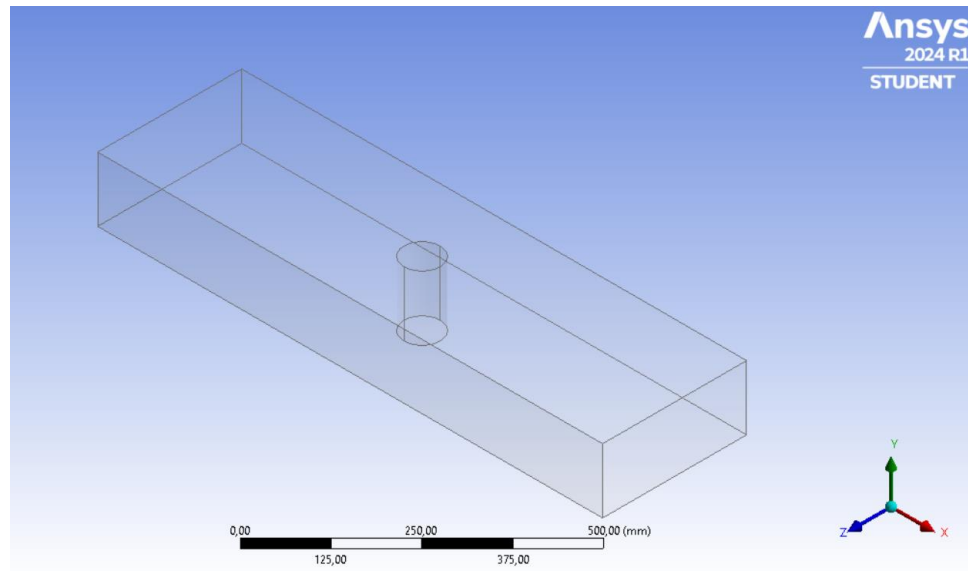


Figura B.2: geometria a simular (font pròpia)

Tot seguit, es duu a terme una operació anomenada sostracció booleana que ens permet descartar el volum del rotor de l'*enclosure* per tal que no el consideri part del flux d'aire.

B.1.2 Mallat

Realitzats dits passos es continua amb la definició del mallat, el fet de realitzar les simulacions des del programari Ansys for Students limita el nombre de nodes amb el que pren molta rellevància la bona optimització del mallat.

La mida del mallat varia segons les zones, a zones amb un alt interès d'estudi inferior és la mida del mallat, en canvi, a zones menys rellevants per a l'estudi el mallat pot ser d'una mida superior.

Així doncs, es determina una mida de mallat general de 30 mm amb una ràtio de creixement d'1,1, un menyspreu de mallats inferiors a 0,15 mm i una curvatura mínima de 0,3 mm.

Referent a les superfícies dels rotors s'hi aplica un estil de mallat especial anomenat inflació, aquest crea unes capes al voltant de les superfícies seleccionades que permet una millor interpretació dels fluids quan impacten sobre la superfície, d'aquest element depèn principalment el valor Yplus (mencionat a l'apartat 4.2) i s'ha de trobar el correcte balanç dels dos valors principals que defineixen aquest estil de mallat, el màxim de capes i la ràtio de creixement. A continuació es deixen unes taules amb totes les combinacions de valors dels mencionats paràmetres que s'han pres fins a trobar l'òptim (el darrer de cada sèrie).

LLIS	MAXIMUM LAYERS	GROWTH RATE	Y PLUS
	10	0,8	87,2227
	10	1,01	30,0022

Figura B.3: combinacions inflació rotor llis (font pròpia)

NO PERFORAT	MAXIMUM LAYERS	GROWTH RATE	Y PLUS
	10	1,01	7,66639
	15	1,01	7,27023
	10	1,4	0,811554

Figura B.4: combinacions inflació rotor no perforat (font pròpia)

PERFORAT	MAXIMUM LAYERS	GROWTH RATE	Y PLUS
	10	1,01	10,8976
	15	1,01	10,8976
	10	1,4	DIVERG.
	VERSIO STUDENT, AUGMENT DEFEATURE SIZE LOCAL		
	15	1,01	14,06
	20	1,01	13,6455
	10	1,01	15,6996
	10	1,4	DIVERG.
	10	2	6,66142
	15	2	DIVERG.
	10	0,8	20,7574
	10	0,7	19,6631
	5	1,01	17,6971
	INFLATION SUPRESSED		
	GROWTH RATE LOCAL	GROWTH RATE GLOBAL	Y PLUS
	1,1	1,1	26,3404
	1,1	1,2	26,3046
	1	1,07	24,6352
	TAMANY MALLAT LOCAL 0,25mm (Nº ELEMENTS >15M), PASSEM A 2D I RECUPEREM INFLATION		
	MAXIMUM LAYERS	GROWTH RATE	Y PLUS
	10	1,1	3,36543
	10	1,4	0,581859
	10	1,3	0,984369

Figura B.5: combinacions inflació rotor perforat (font pròpia)

Finalment, s'obté el mallat resultant que queda de la següent forma:

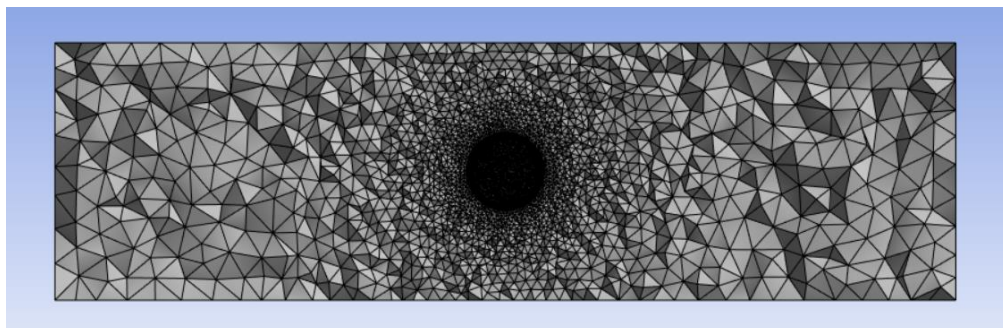


Figura B.6: mallat final rotor llis (font pròpia)

Com es pot apreciar, a major proximitat del rotor, més petit és el mallat, ja que hi ha més punts d'alt interès d'estudi. A la següent figura (figura B.7) és clarament visible el tipus de mallat d'inflació i totes les seves capes que ens permetran una major precisió a la resposta que obtindrem.

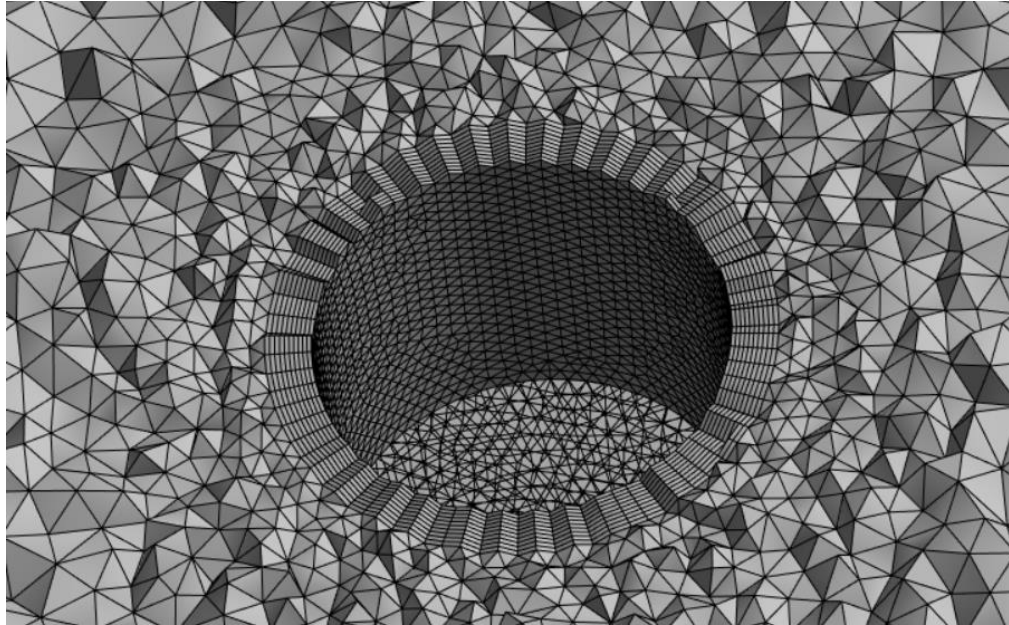


Figura B.7: detall mallat final rotor llis (font pròpia)

Cal mencionar que en el mallat del rotor perforat en ser una geometria més complexa es va haver d'optar per una versió més simplificada (per a la problemàtica de versions del programari) reduint l'altura del rodet a una altura d'1 mm mantenint, però el radi inicial, és per això que en els resultats finals es multipliquen 125 mm amb l'objectiu d'obtenir uns resultats justos.

Un cop dimensionat el mallat, s'assignen els rols de cada superfície determinant així els punts d'entrada i sortida de l'aire, les parets que delimiten el volum d'aire, i finalment el rotor.

B.1.3 Configuració de la simulació

Generat i actualitzat el mallat òptim, es procedeix a la configuració de la simulació.

En el menú inicial ens permet seleccionar el model de turbulència desitjat, en aquest cas ens convé emprar el model kOmega per les condicions de paret. També es determinen els dos materials que intervenen a la simulació que en aquest cas es deixaran els predeterminats (aire pel flux i alumini pel rotor).

Continuant amb les condicions d'entorn, aquí és on es podrà determinar tant el règim de gir del rotor (exemple a la figura B.8) i la velocitat del flux d'aire.

Figura B.8: configuració règim de gir del rotor llis a 2100 rad/s (font pròpia)

Precisament en aquest apartat és on es pot ajustar la configuració de la paret si es vol que vagi a la velocitat del flux d'aire o bé que sigui estàtica.

Finalitzada la configuració es procedeix al càlcul de les solucions inicialitzant-les posteriorment calculant-les, aquí es pot determinar el nombre d'iteracions que es desitgin, però a la pràctica un cop el gràfic ens indica que la solució no divergeix (figura B.9) es pot aturar el càlcul.

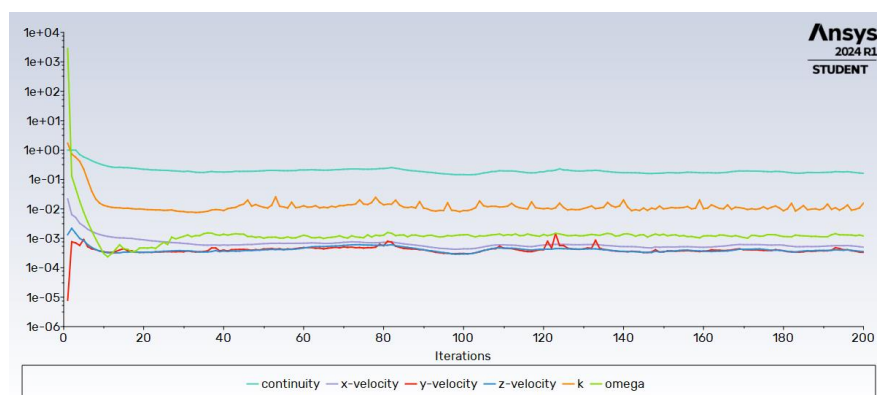


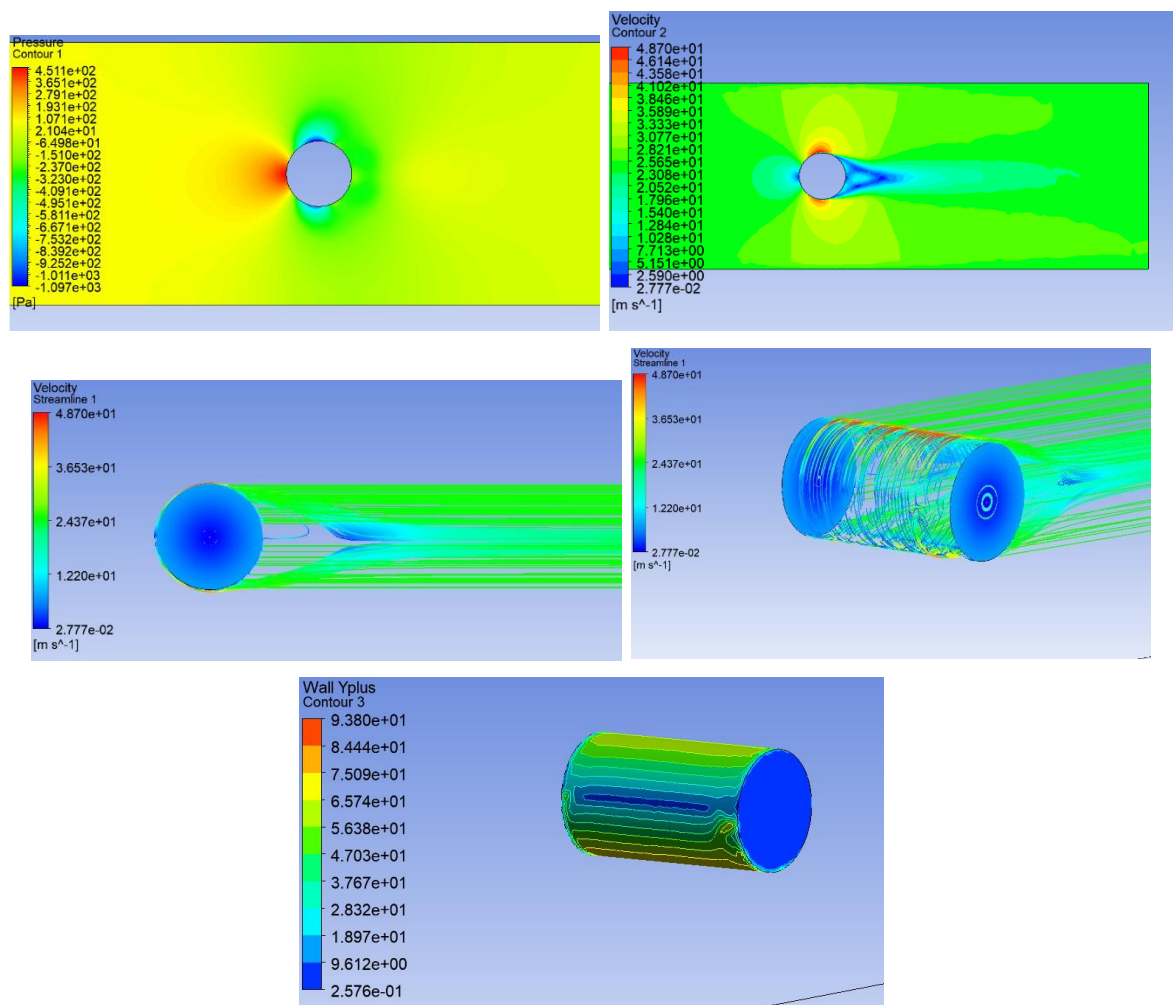
Figura B.9: gràfic de 200 iteracions del rotor llis que no divergeix (font pròpia)

B.1.4 Resultats

Per acabar, es passa als resultats que per facilitar les interpretacions es crea un pla que travessi el rotor per la meitat i es plasmaran els diferents contorns desitjats com poden ser la velocitat o les pressions. És en aquest apartat on es pot obtenir el valor y_{Plus} que ens permet corroborar la veracitat de la simulació. A continuació es mostraran tots els resultats obtinguts de totes les simulacions.

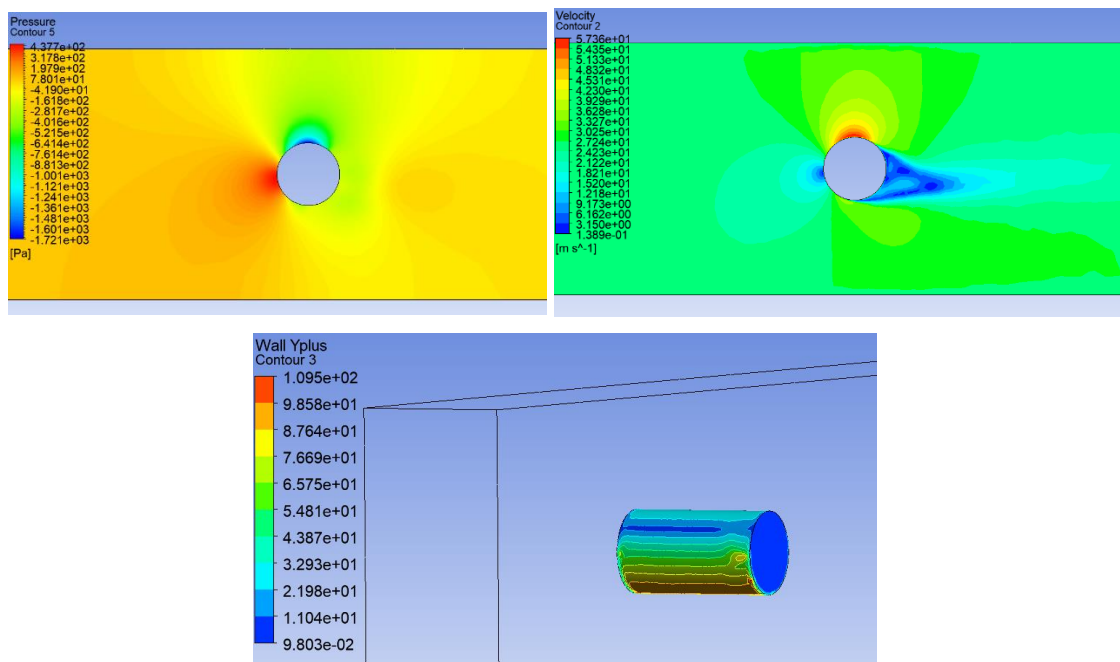
Rotor lliure:

- 210 rad/s:



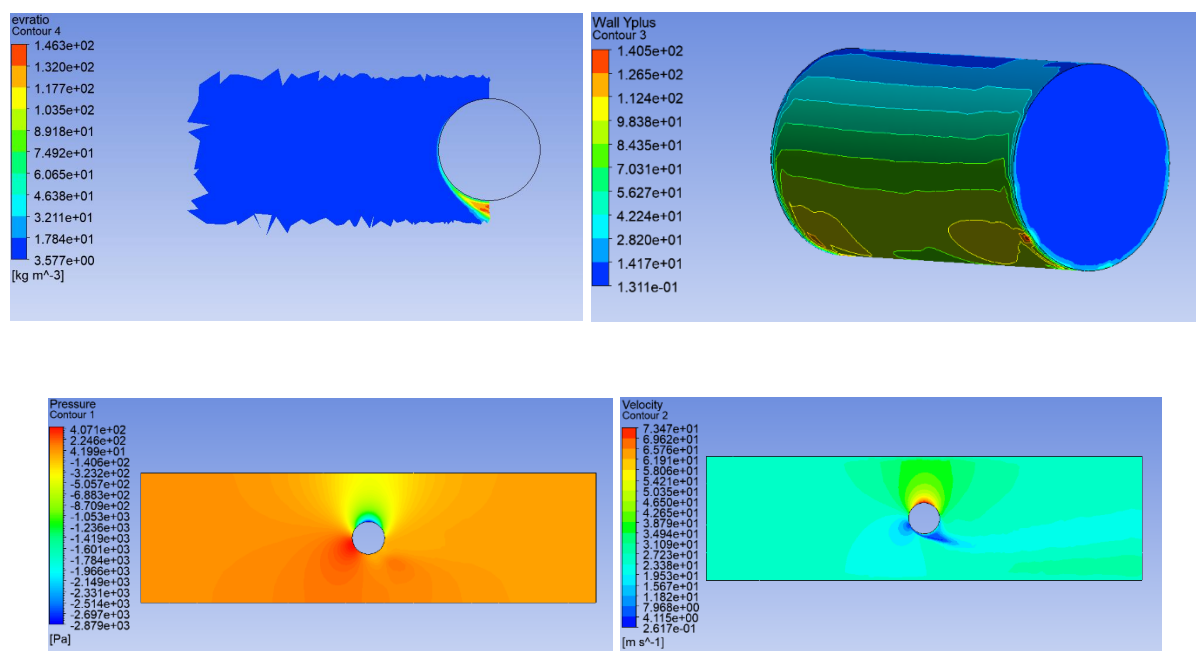
Conjunt de figures B.10: resultats simulació rotor lliure a 210 rad/s (font pròpia)

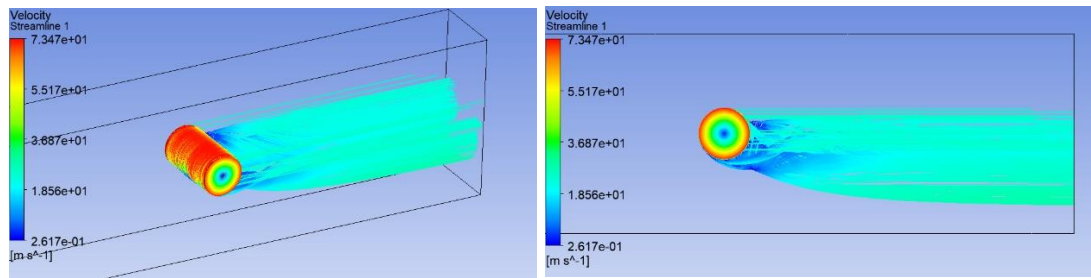
- A 1050 rad/s:



Conjunt de figures B.11: resultats simulació rotor llis a 1050 rad/s (font pròpia)

- A 2100 rad/s:

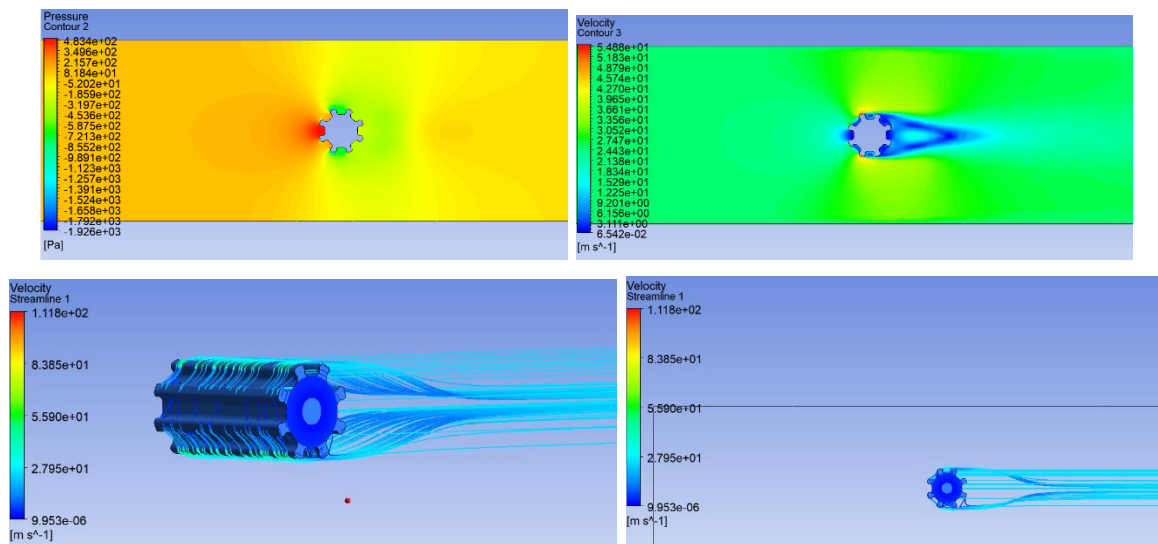




Conjunt de figures B.12: resultats simulació rotor llis a 2100 rad/s (font pròpia)

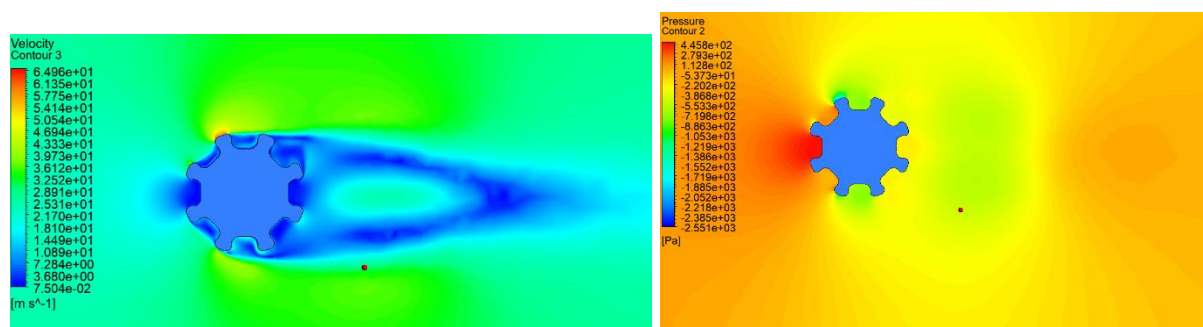
Rotor no perforat:

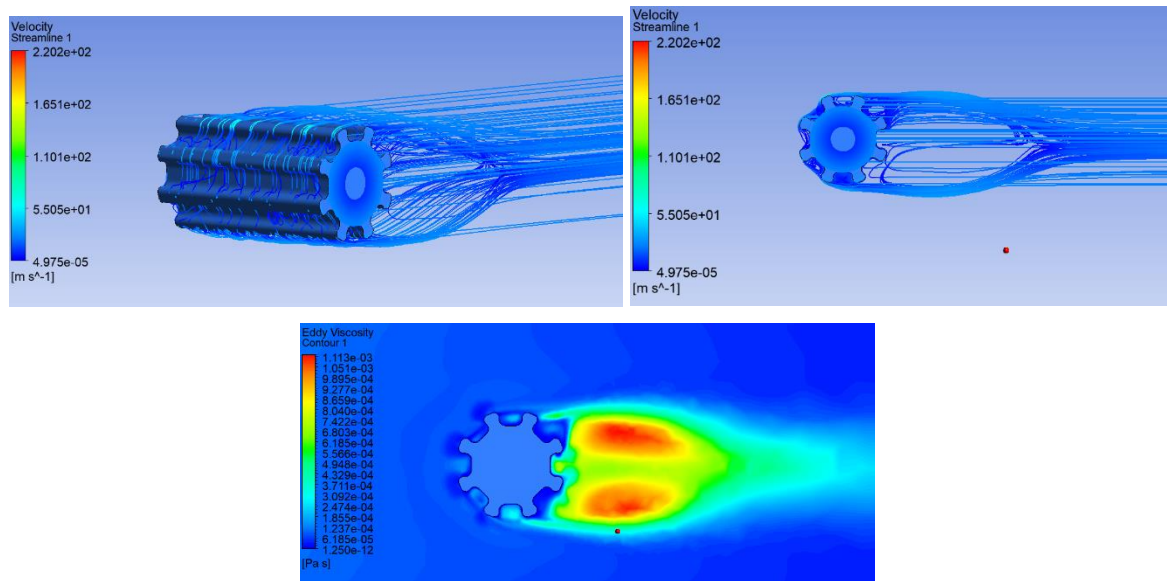
- A 210 rad/s:



Conjunt de figures B.13: resultats simulació rotor no perforat a 210 rad/s (font pròpia)

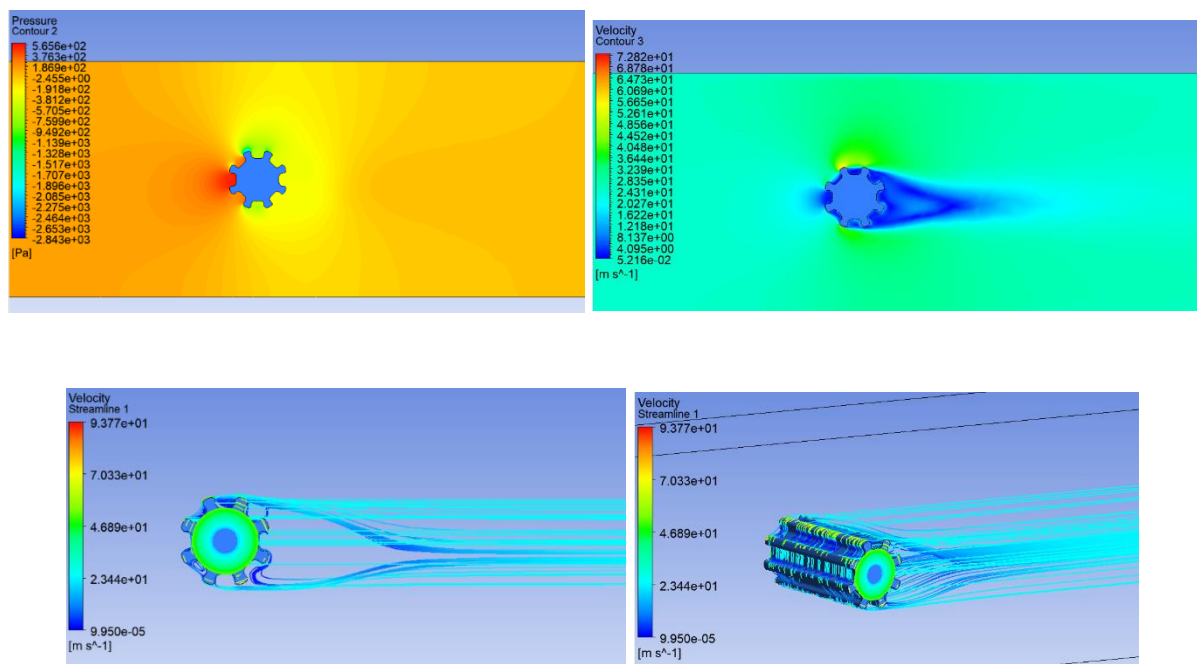
- A 1050 rad/s:

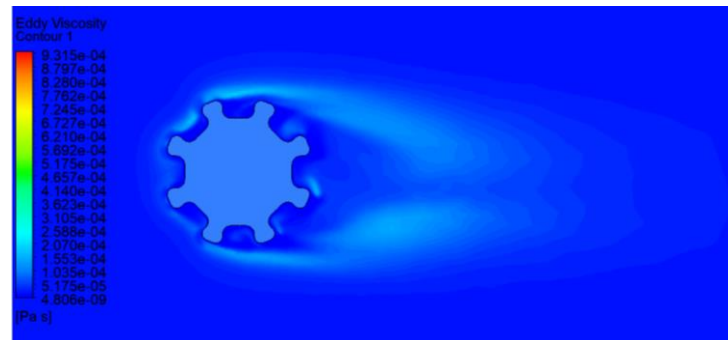




Conjunt de figures B.14: resultats simulació rotor no perforat a 1050 rad/s (font pròpia)

- A 2100 rad/s:

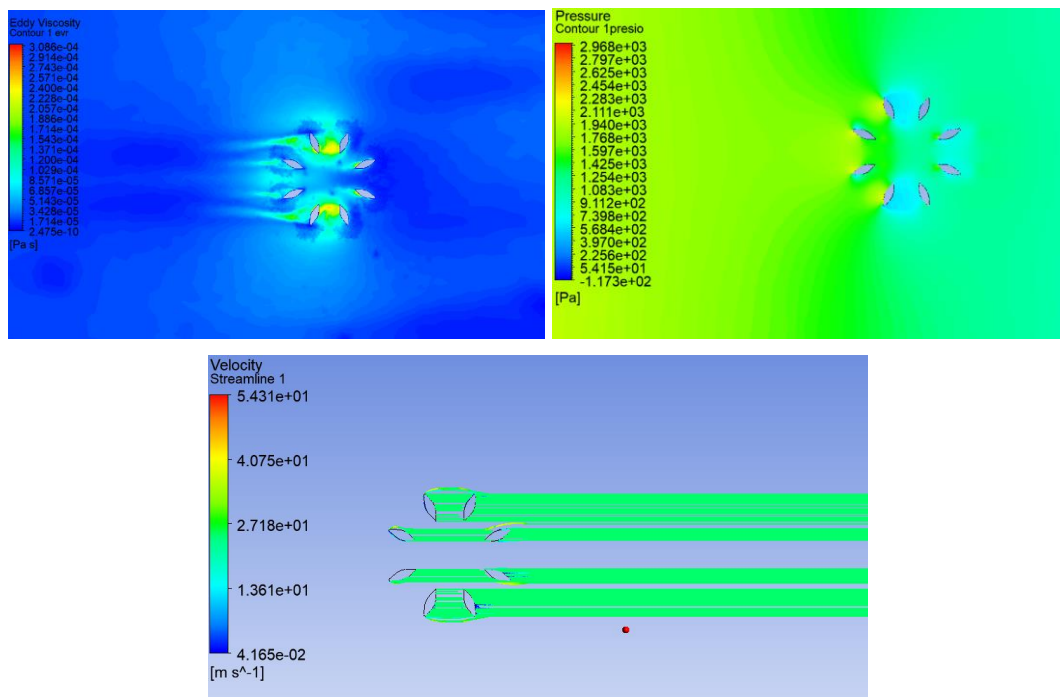




Conjunt de figures B.15: resultats simulació rotor no perforat a 2100 rad/s (font pròpia)

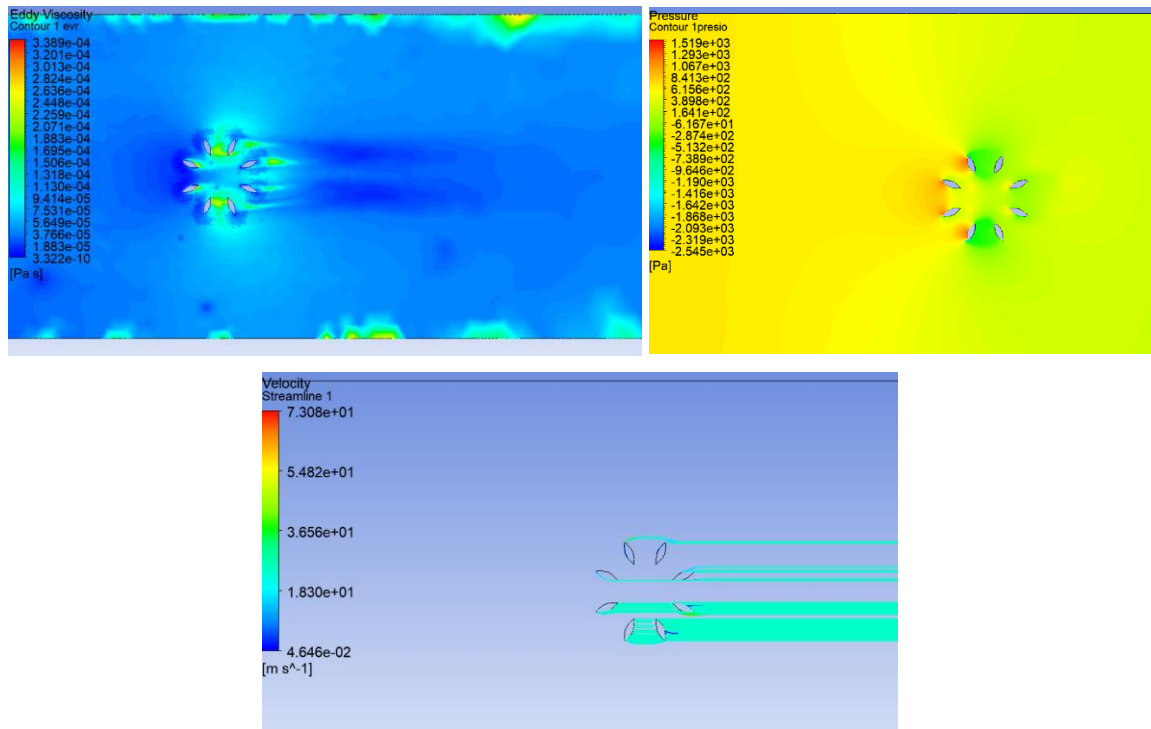
Rotor perforat:

- A 210 rad/s:



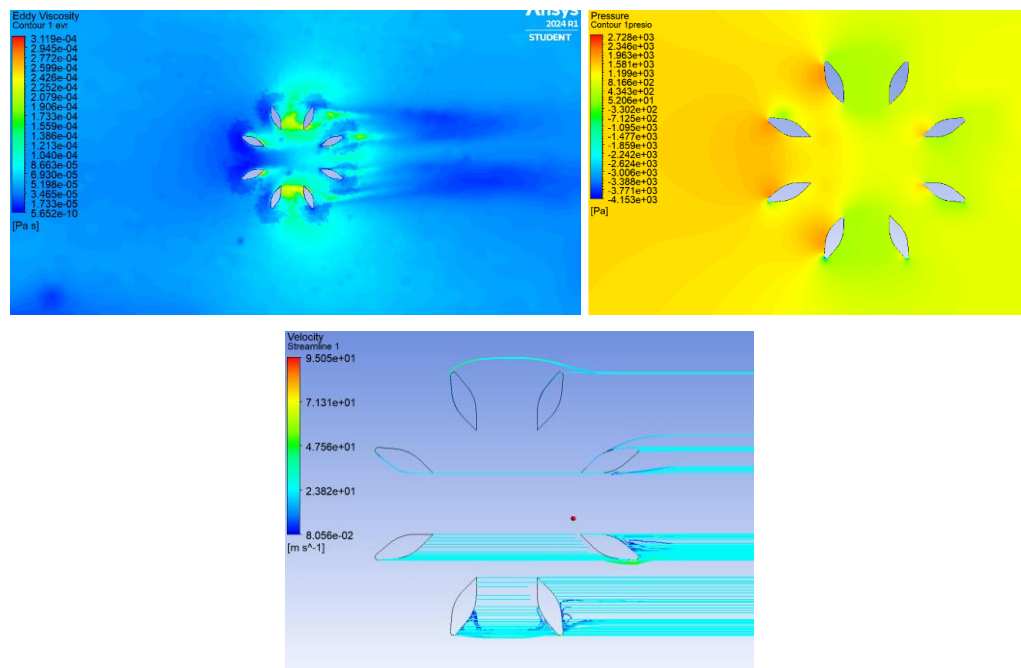
Conjunt de figures B.16: resultats simulació rotor perforat a 210 rad/s (font pròpia)

- A 1050 rad/s:



Conjunt de figures B.17: resultats simulació rotor perforat a 1050 rad/s (font pròpia)

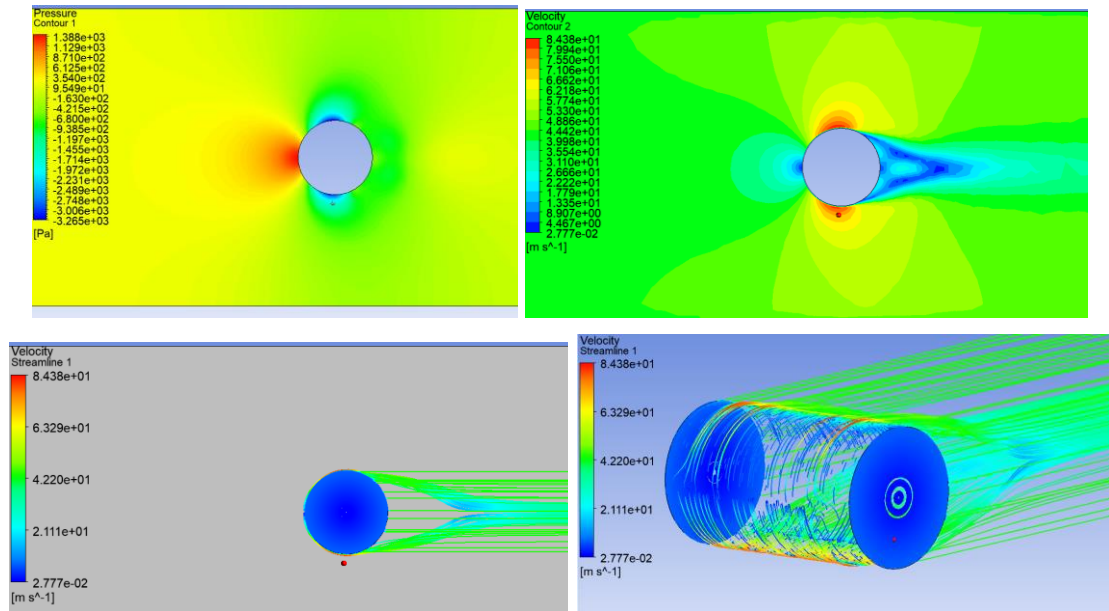
- A 2100 rad/s:



Conjunt de figures B.18: resultats simulació rotor perforat a 2100 rad/s (font pròpia)

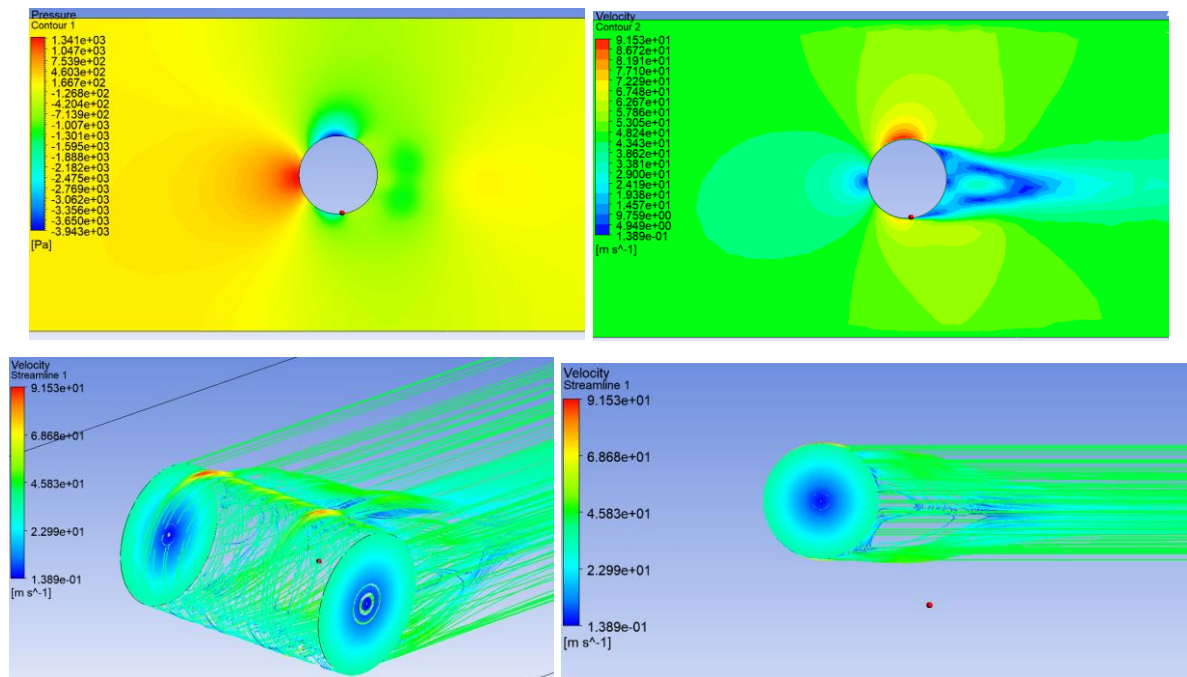
Resultats de l'estudi del cas aïllat (apartat 4.3.1):

- A 210 rad/s:



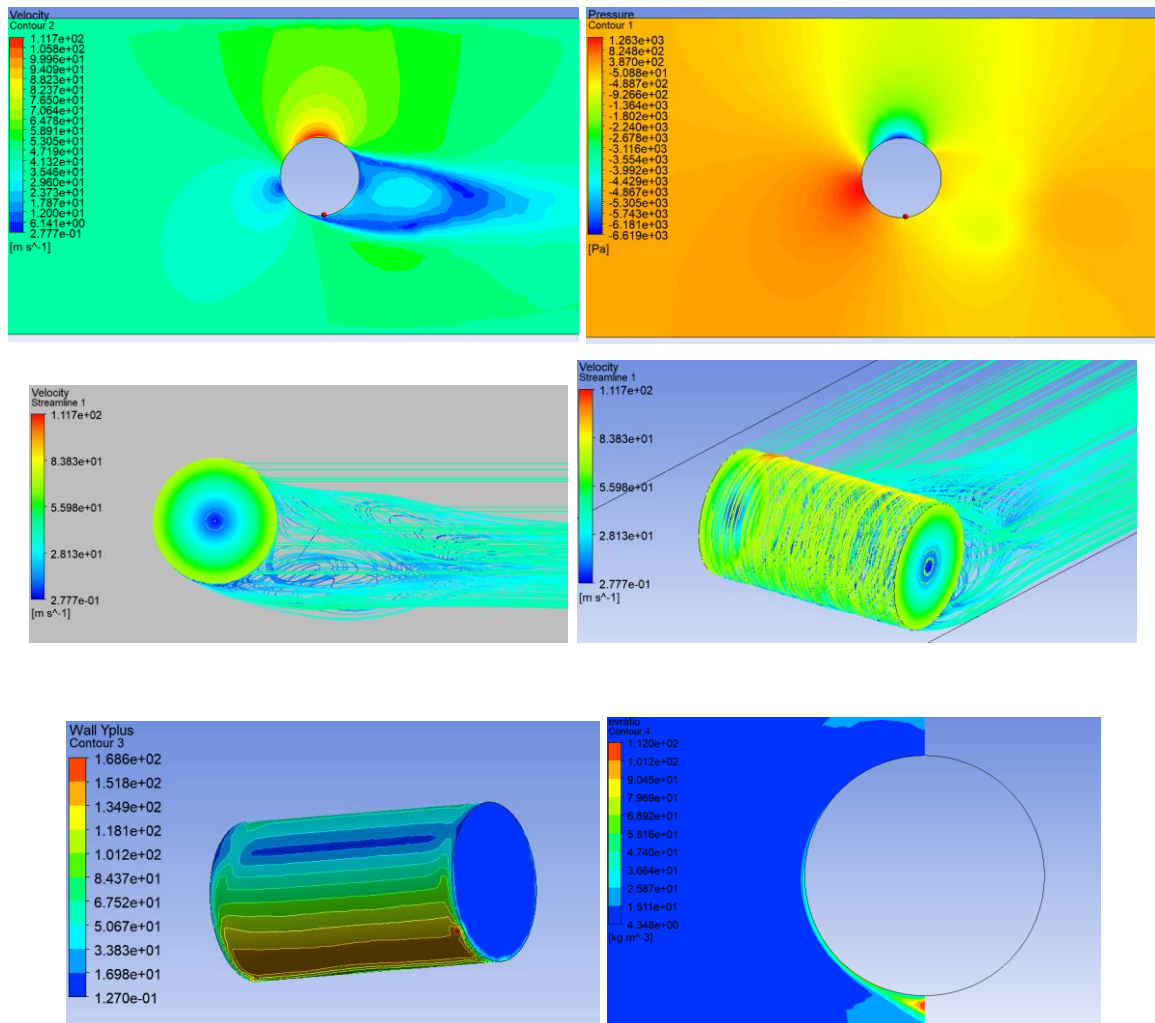
Conjunt de figures B.19: resultats simulació cas aïllat a 210 rad/s (font pròpia)

- A 1050rad/s:



Conjunt de figures B.20: resultats simulació cas aïllat a 1050 rad/s (font pròpia)

- A 2100 rad/s:

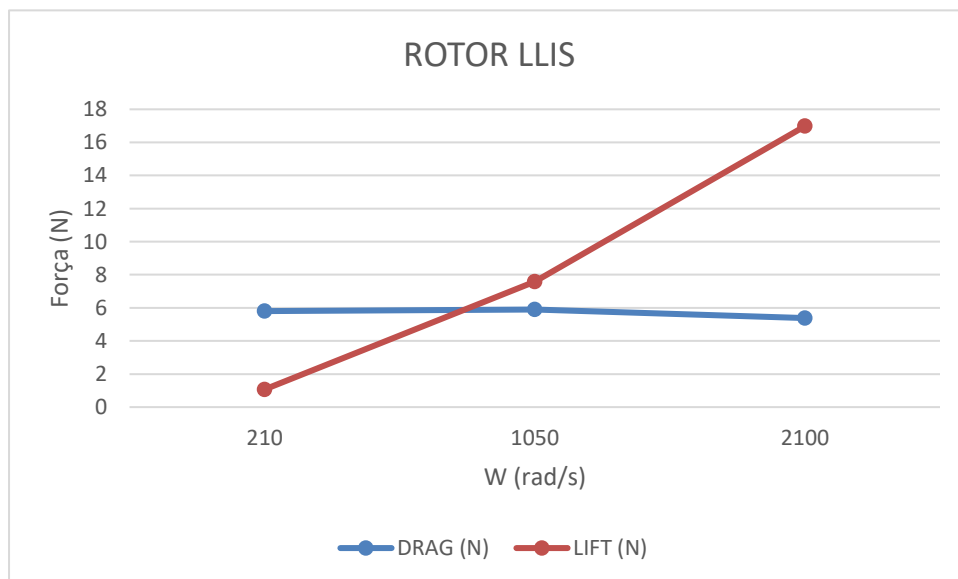


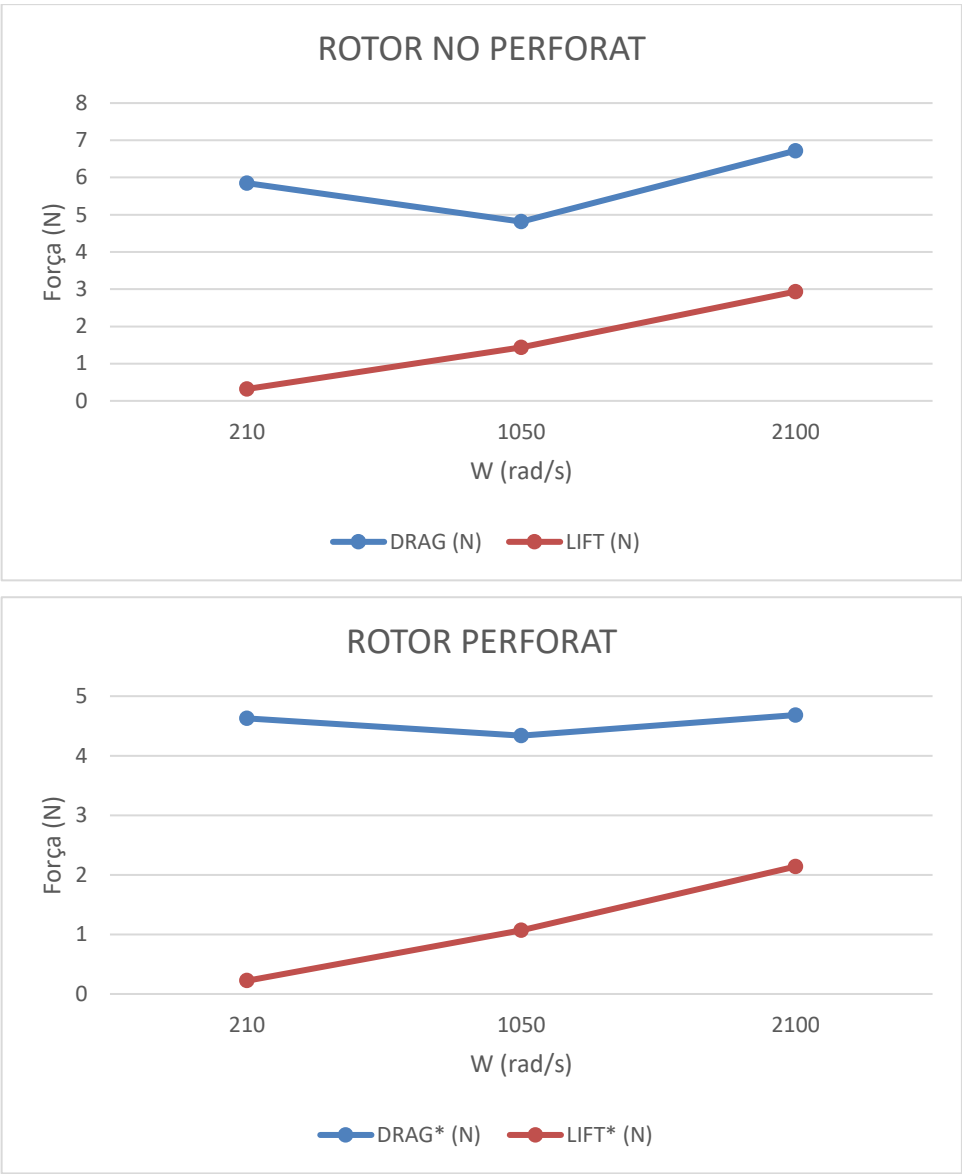
Conjunt de figures B.21: resultats simulació cas aïllat a 2100 rad/s (font pròpia)

B.2 Síntesi de dades

Del processament de totes les dades i obtenció de les forces resultants (tant la Drag com la Lift) mitjançant les fórmules de càlcul brindat per programari mateix s'han desenvolupat les següents taules i gràfics.

LLIS	W(rad/s)	Y PLUS	DRAG (N)	LIFT (N)	L/D
	210	30,0022	5,81097	1,06911	0,184
	1050	37,035	5,89739	7,57504	1,284
	2100	50,4191	5,38233	16,9774	3,154
NO PERFORAT	W(rad/s)	Y PLUS	DRAG (N)	LIFT (N)	L/D
	210	0,811554	5,84575	0,319931	0,055
	1050	0,995137	4,81516	1,44164	0,299
	2100	1,8677	6,72028	2,93618	0,437
PERFORAT	W(rad/s)	Y PLUS	DRAG* (N)	LIFT* (N)	L/D
	210	0,984369	4,6246	0,22259875	0,048
	1050	1,04245	4,33735	1,06706875	0,246
	2100	1,20901	4,683275	2,1388875	0,457

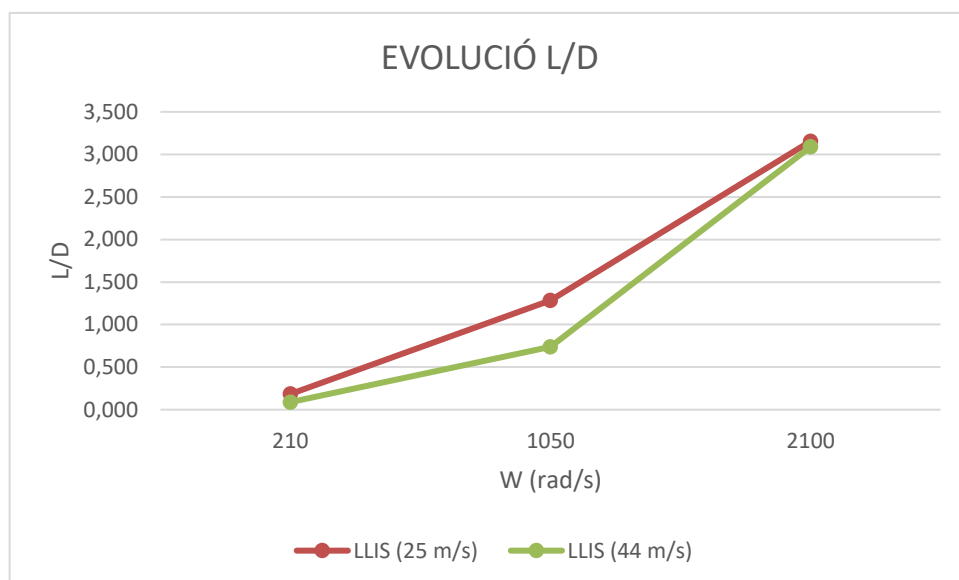
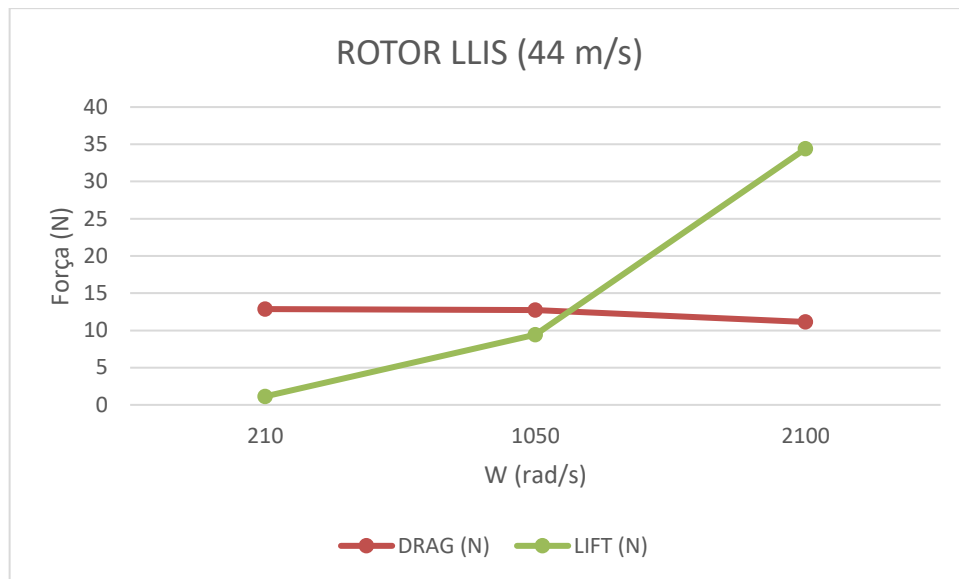




Conjunt de figures B.22: gràfics i taules amb els resultats de les simulacions principals (font pròpia)

Concloent aquest apartat, referent a l'estudi del cas aïllat s'han tret els següents gràfics i taula:

LLIS	W(rad/s)	Y PLUS	DRAG (N)	LIFT (N)	L/D
	210	48,465	12,8686	1,14471	0,089
	1050	53,3878	12,7548	9,43357	0,740
	2100	59,6605	11,136	34,3966	3,089



Conjunt de figures B.23: gràfics i taula amb els resultats de la simulació del cas aïllat (font pròpia)