

### 7.6.1. Anàlisi d'alternatives al perfil Selig

Ara ja tenim un model de vela escollit construït amb el perfil Selig, un sweep de 35°, un twist de 45° i una contraescora de 20°. És ara quan caldrà veure si variant solsament el perfil (provarem els altres dos triats: FX63137 i FX76MP140) millorem aquest model. És per això que hem simulat la mateixa vela (model V8) amb les mateixes condicions que ja havíem simulat la vela 8 amb el perfil Selig, però amb els dos perfils restants (FX63137 i FX76MP140). Així obtenim els següents resultats, directament descomposats en els eixos de navegació:

$\alpha$ (°)	$F_M$ (N)	$F_D$ (N)	$F_Z$ (N)	rend. vèlic	$\eta_z$	$F_{VEILICA}$ (N)	rend. ponderat
30	1.459	1.407	940	1,04	0,42	2235	0,91
35	1434	1553	1007	0,92	0,43	2342	0,82
40	1268	1660	972	0,76	0,42	2304	0,70
45	1076	1736	923	0,62	0,41	2241	0,58
50	908	1827	912	0,50	0,41	2235	0,48
55	723	1.920	885	0,38	0,40	2235	0,38

Taula 7.9: Forces útils (amb  $\beta=60^\circ$ ),  $V_A=22,5$  m/s. **Perfil FX76MP140**

$\alpha$ (°)	$F_M$ (N)	$F_D$ (N)	$F_Z$ (N)	rend. vèlic	$\eta_z$	$F_{VEILICA}$ (N)	rend. ponderat
30	1.460	1.419	948	1,03	0,42	2246	0,91
35	1.405	1.549	990	0,91	0,43	2314	0,81
40	1.243	1.655	958	0,75	0,42	2281	0,68
45	1.045	1.723	902	0,61	0,41	2208	0,57
50	876	1.830	888	0,48	0,40	2215	0,46
55	704	1.905	876	0,37	0,40	2212	0,37

Taula 7.10: Forces útils (amb  $\beta=60^\circ$ ),  $V_A=22,5$  m/s. **Perfil FX63137**

Ara ja disposem de prou dades per comparar els tres perfils en les mateixes condicions de disseny, de contorn,... Per tal de facilitar l'anàlisi corresponent passarem a presentar els gràfics dels paràmetres més importants. I posteriorment veurem quins dels tres perfils presenta millors condicions de treball per a ser el candidat a solució final.



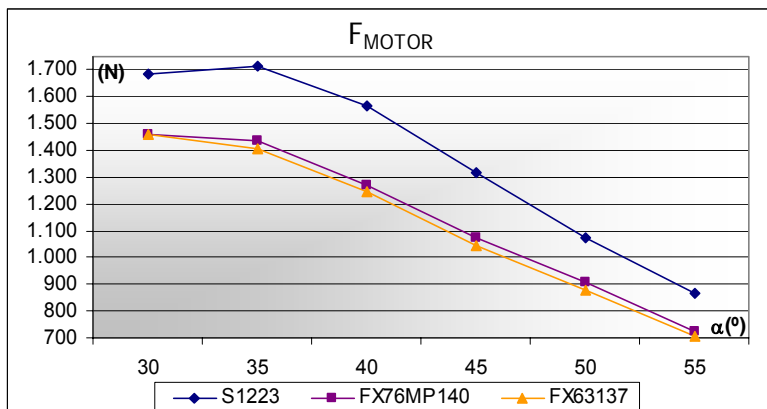


Fig. 7.30: Gràfics de  $F_M$  en funció de  $\alpha$ , dades de Taula 7.8, Taula 7.9 i Taula 7.10

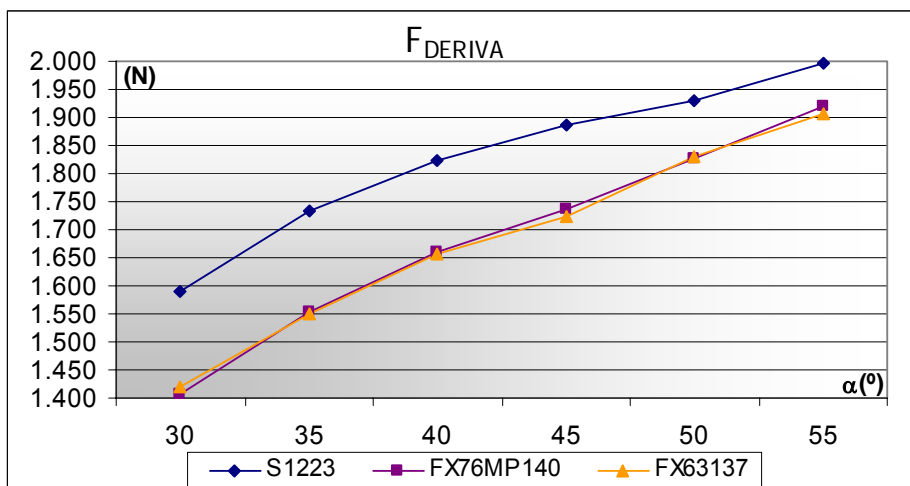


Fig. 7.31: Gràfics de  $F_D$  en funció de  $\alpha$ , dades de Taula 7.8, Taula 7.9 i Taula 7.10

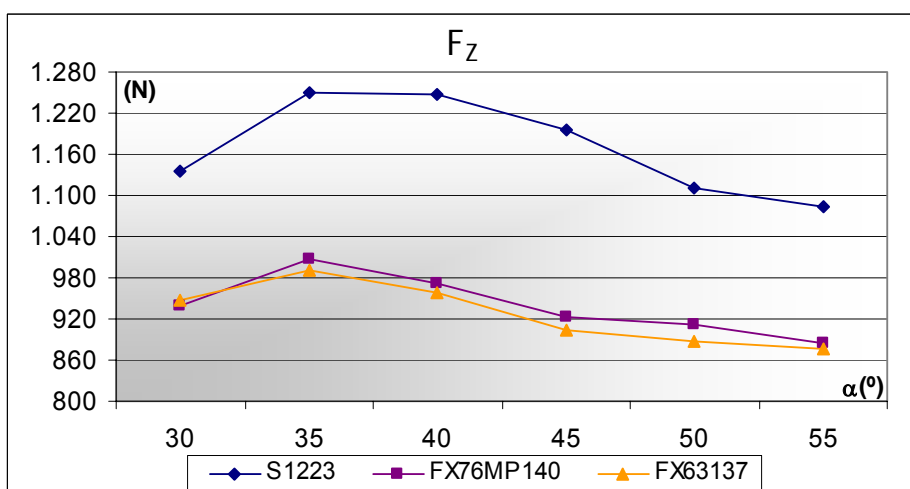
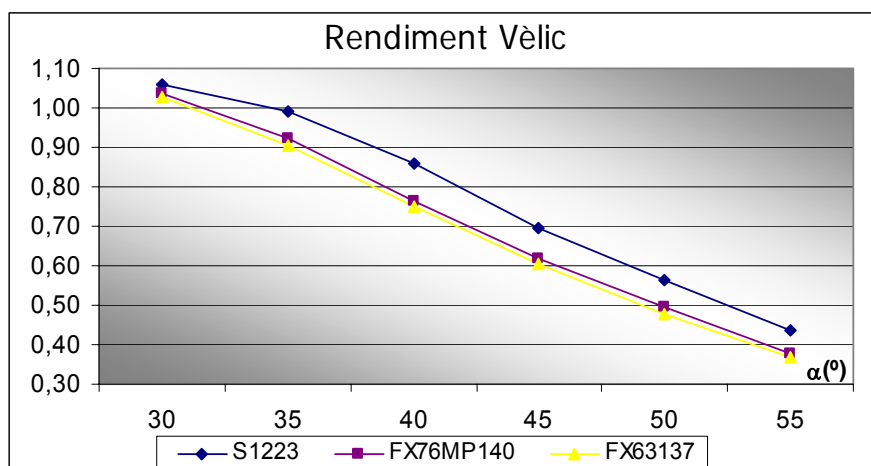


Fig. 7.32: Gràfics de  $F_z$  en funció de  $\alpha$ , dades de Taula 7.8, Taula 7.9 i Taula 7.10

Per ajudar-nos a veure la capacitat de cada cas a generar força d'empenta a partir de la força total o vèlica caldrà comparar el rendiment vèlic:

Fig. 7.33: Rendiment vèlic en funció de  $\alpha$ , dades de Taula 7.8, Taula 7.9 i Taula 7.10

Com podem apreciar hi ha diferents punts a destacar al llarg de les dades presentades en aquest apartat:

- Força motor o empenta ( $F_{\text{MOTOR}}$ ). Podem veure com al llarg dels diferents angles d'atac el perfil Selig presenta un valor de força superior, amb diferència als altres dos perfils. Una diferència que podem quantificar en  $\approx 275\text{N}$ , que si apliquem les lleis de Newton, equivaldria a una acceleració a tot el conjunt (pilot i embarcació) addicional de  $0,22\text{m/s}^2$ , que podria veure's augmentada si aconseguíssim rebaixar l'angle d'atac (menys de  $35^\circ$ ), suposant que la tendència indicada al gràfic fos tal.
- Força lateral o deriva ( $F_D$ ). Pel que fa a aquesta força es veu clarament que el perfil Selig està per sobre dels altres dos, de forma clara. Aquest fet és rellevant però no fatídic, ja que si fem servir les equacions i equilibris del capítol 5, veuríem que en tots els casos estem dins l'equilibri i no bolcaríem. També ens indica que el perfil sembla tenir més capacitat a generar força vèlica, ja que té més força motor, més força deriva i, com veurem seguidament, més força ascendent, és a dir, es un perfil que generarà més volum de forces, més forces aerodinàmiques.
- Força ascendent ( $F_z$ ) i rendiment d'alleujament ( $\eta_z$ ). Aquest paràmetre torna a ser molt important i alhora difícil de dir. Com ja hem vist anteriorment, ens hem autoimposat uns límits per assegurar-nos garantir l'equilibri tant vertical com de bolcada. Recordant que és recomanable, per les raons exposades en aquest i



anterior capítols, que  $\eta_z < 0,5$  i que  $F_z \leq 1250N$ . Així doncs tenim que tots tres perfils compleixen aquestes condicions i és el Selig el que en tot moment té més rendiment d'alleujament i alhora major mòdul de força ascendent.

- Rendiment vàlic ( $\eta_v$ ). Aquest paràmetre, i a partir del ja citat, és clar que el perfil S1223 sortirà beneficiat i per sobre els altres dos perfils com podem apreciar a Fig. 7.33, sobretot per angles superiors als  $30^\circ$ , i sembla que per a angles més petits serien tots tres molt semblants, tot i que en condicions de navegació amb vent llarg (capítol 6) sabem que serà molt difícil tenir angles d'atac inferiors als  $30^\circ$ .
- Finalment cal veure que els perfils FX63137 i el FX76MP140 són dos perfils que en tot moment són pràcticament idèntics i amb poques diferències. Tot i que per poca diferència el FX76MP140 seria millor, tenint més força motor i ascendent.

Així doncs, segons aquestes conclusions, hem pogut demostrar que la tria del perfil Selig com a primera aproximació ha estat del tot encertada.

### 7.6.2. Anàlisi de la variació de la contraescora

Com ja havíem previst anteriorment, es aquí on analitzarem els efectes de la variació de la contraescora sobre l'embarcació (forces, equilibris,...). Això ho fem un cop ja tenim degudament escollit el model de vela i el perfil que la conformarà. Per tal de facilitar la comprensió de l'anàlisi presentem seguidament les conclusions extretes d'aquest estudi, que el podrem trobar perfectament detallat al Annex D.

L'experiència dels pilots coincideix amb els nostres resultats obtinguts per FLUENT: quan es navega amb vents superiors als 40 nusos, navegar amb angles de contraescora al voltant dels  $20^\circ$  és la millor solució possible per tal d'optimitzar la vela i alhora poder mantenir en equilibri l'embarcació.

Per assolir el rècord de velocitat no es pot navegar amb contraescora baixa (vela poc inclinada) ja que es força innecessàriament l'aleta. L'experiència ho ha demostrat: Björn Dunkerbeck va intentar fer el rècord de velocitat a la costa de Tenerife l'any 2003. En aquelles condicions de forts vents les onades eren importants, de manera que cap pilot podia mantenir una contraescora si volia mantenir l'embarcació surant durant tota la prova. Els resultats finals van ser molt negatius: tot i els forts vents, velocitats inferiors als 42 nusos (bàsicament per culpa de les onades, que porten molta inestabilitat al windsurf), i, a sobre, les aletes fetes malbé a causa del sobreforç que van haver d'aguantar.



Tampoc es pot assolir el rècord de velocitat navegant amb una contraescora elevada ja que, en condicions de vents superiors a 40 nusos (necessàries per poder obtenir una empenta suficientment alta com per batre els 46 nusos) cap pilot és capaç de mantenir l'embarcació surant sobre la superfície del mar. El motiu: la forta empenta aerodinàmica que impulsa l'embarcació cap amunt. És bastant obvi aquest fet: a mesura que inclinem la vela (augmentem la contraescora), el comportament de la vela s'assimila cada cop més al d'un planejador, i en conseqüència, cada cop pren més importància  $F_z$  (que equival ja a una empenta d'aeronàutica) en detriment de la força motor i la deriva.

### 7.6.3. Anàlisi de la variació de l'angle de navegació ( $\beta$ )

Aquest darrer estudi ens servirà per veure la influència d'aquest angle sobre la vela i les forces aerodinàmiques. Per veure el estudi complet consultar l'Annex D, capítol 5. Seguidament presentem les conclusions:

#### I. Fixem l'angle d'atac ( $\alpha$ ).

Com podem apreciar en la Taula D.5.2 i Taula D.5.3 veiem com augmentar el valor de  $\beta$  implicaria un augment de  $F_M$  i una disminució de  $F_D$ , implicant un augment del rendiment vàlic. En cap cas, un canvi de l'angle  $\beta$  implicaria un canvi en  $F_z$  donat que aquesta força no variarà el seu eix principal.

#### II. Fixem l'angle ( $\beta-\alpha$ ).

Amb les taules i figures del present capítol (Annex D, capítol 5) podem veure com el conjunt d'angles que presenta major rendiment vàlic, és a dir, major força d'empenta i menor força de deriva és una  $\beta$  de  $60^\circ$  i un angle d'atac de  $40^\circ$ . A més a més també és el que presenta major rendiment d'alleujament i força ascendent, ambdós valors per sota dels límits recomanats. Aquest fet fa que la suposició, extreta de l'intens anàlisi de la Mecànica del windsurf i dels paràmetres de control (ambdós capítols de la Memòria) sigui totalment correcte, a més de donar validesa als anàlisis i estudis realitzats en aquest punt concret ( $\alpha=40^\circ$  i  $\beta=60^\circ$ ).

També es pot observar que el rendiment vàlic es manté més estable per a valors elevats (de la parella d'angles), superiors al valor òptim ( $\alpha=40^\circ$  i  $\beta=60^\circ$ ). En canvi, per a valors inferiors ( a l'esquerra) trobem que el rendiment varia de forma més brusca, ja que la  $F_{MOTOR}$  segueix una tendència semblant.

Pel que fa a  $F_D$  veiem que com més a l'esquerra anem (valors baixos  $\alpha$  i  $\beta$ ) més alta serà aquesta força i per tant més fàcil serà tenir problemes d'estabilitat i més difícilment podrem evitar bolcar, tot i que estarem dintre de l'estabilitat amb un cert marge de



seguretat. Finalment la força ascendent, es pot veure que els casos més òptims són per al parell (35°,55°) i (40°,60°) ambdós dintre dels límits recomanats.

## 7.7. Anàlisi i comparació dels resultats

Un cop ja sabem com treballa el model escollit ( vela 8 i el perfil Selig) és el moment de comparar i analitzar si s'ha aconseguit optimitzar la vela de velocitat modelitzada (7.2 Modelització d'una vela de velocitat, pàg.49). Per tal de comparar de manera més general, presentarem de forma gràfica els valors presentats amb anterioritat de la vela convencional (Taula 7.2, pàg.56) i els representarem en gràfics conjuntament amb els del model de vela 8 i perfil Selig (Taula 7.10, pàg. 81). Serà d'aquesta manera com podrem veure fàcilment i extreure'n conclusions de forma més eficaç i clara.

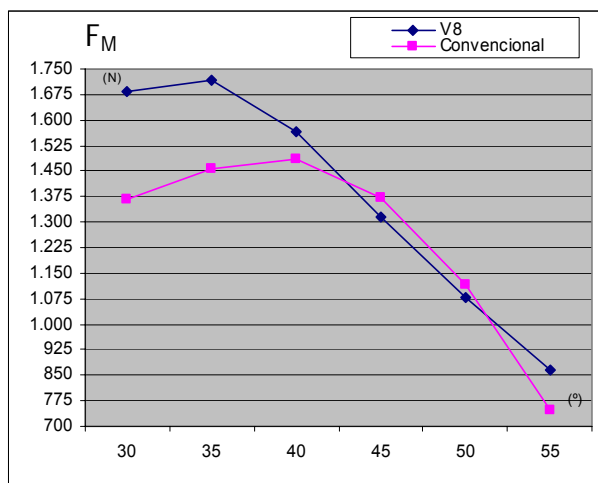


Fig. 7.34: Evolució de  $F_{MOTOR}$  funció de  $\alpha$

Com podem veure el gràfic, veiem que pel que fa a  $F_M$  hi ha dos zones ben marcades, la primera per a angles d'atac de menys de 45° i a la dreta, per a angles de més de 45°. En la zona esquerra, podem veure com el valor de  $F_M$  és més gran per al cas del model V8 que no pas per a la vela convencional, tot i que per al cas de 45° es veu com presenten un valor pràcticament igual. En canvi, per a angles superiors als 40°, ens trobem que la vela convencional té un valor de  $F_M$  igual al model V8, tot i que a partir dels 50° torna a ser la vela 8 la que presenta més força d'empenta. Això ens porta a dir, que ens aquest aspecte, la vela optimitzada (V8) no ha millorat de forma clara a la vela convencional entre els 45°-50°, però almenys seguim estant en valors molt semblants, i que per a la resta d'angles inferiors als



40° ( o bé superiors a 50°) si que tindrem una vela millor que la vela convencional de velocitat i de forma molt clara i notòria. Destaquem la gran millora en els angles de 30° a 40°.

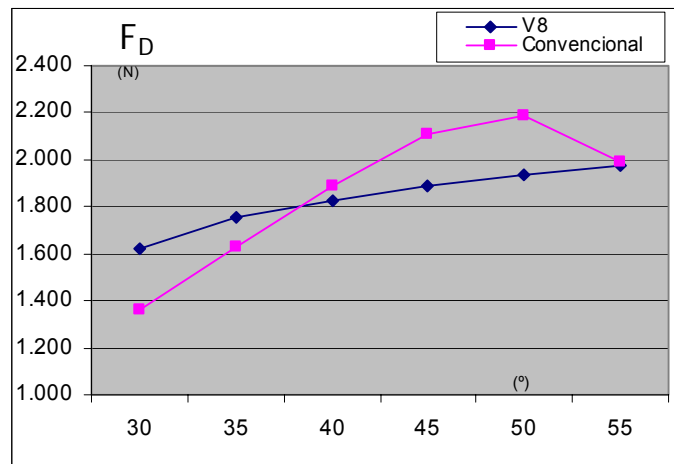


Fig. 7.35: Evolució de  $F_{\text{DERIVA}}$  funció de  $\alpha$

Ara passem a veure les diferències entre  $F_{\text{DERIVA}}$  de cadascuna de les veles, optimitzada i real. En aquest punt veiem també que existeixen dos zones diferenciades, la de menys de 40° i la zona de més de 40° (fins als 55°).

Per al cas de menys de 40° podem apreciar que la vela convencional generarà menys força lateral o deriva tot i que tendeix igualar-se a la V8 i augmenta de forma ràpida i clara. És a partir dels 40° quan podem veure com V8, tot i augmentar  $F_D$ , és manté per sota de la vela convencional.

El fet de tenir menys  $F_D$  en la zona de més angle d'atac ens ajudarà de forma molt clara a mantenir estable l'embarcació i facilitarà al pilot poder pilotar l'embarcació en posicions més favorables ja que al ser més estable podria facilitar al pilot el canvi de posició per tal de millorar-la i alhora que podria millorar la força motora, veure 5.3.4 Equilibri de moments, pàg. 33.

De la mateixa manera voldríem fer notar que els angles de 40° a 50°, per a la vela real, són inestables, amb valors de força que el pilot seria incapaç de suportar si tenim en compte les equacions de 5.3.4 (pàg. 33.), ja que la força de deriva és molt gran. Aquest fet fa que puguem confirmar que, la vela V8, a diferència de la real, no bolcaria.



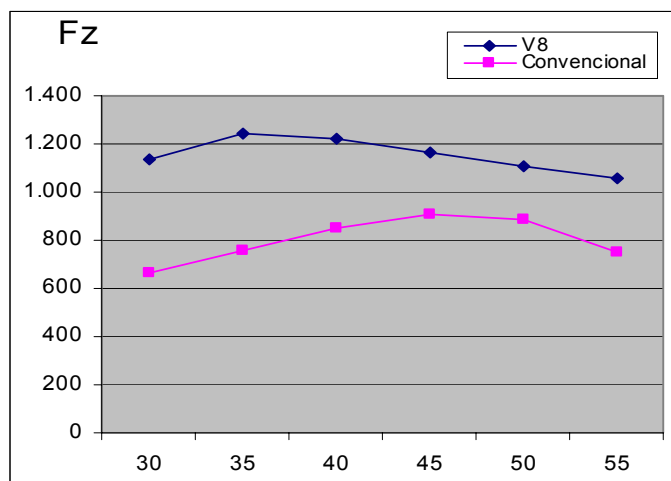


Fig. 7.36: Evolució de  $F_z$  funció de  $\alpha$

Per a la força ascendent ( $F_z$ ) tenim que clarament hem obtingut una vela molt més òptima en aquest aspecte, ja que en tot moment presenta un mòdul de força més elevat que la vela convencional a més d'estar per sota del valor límit de seguretat (1.250N). Aquest valor, al llarg dels diferents angles d'atac, permet reduir les resistències hidrodinàmiques, i de retruc millorarà la velocitat màxima assolible. Això seria equivalent a disposar de més empenta ( $F_M$ ).

Per tal d'avaluar de forma més general els valors anteriors passem a mostrar els diferents rendiments calculats al llarg de la memòria (rendiment alleujament i rendiment vèlic) i com a representació final mostrarem el rendiment ponderat de les dues veles.

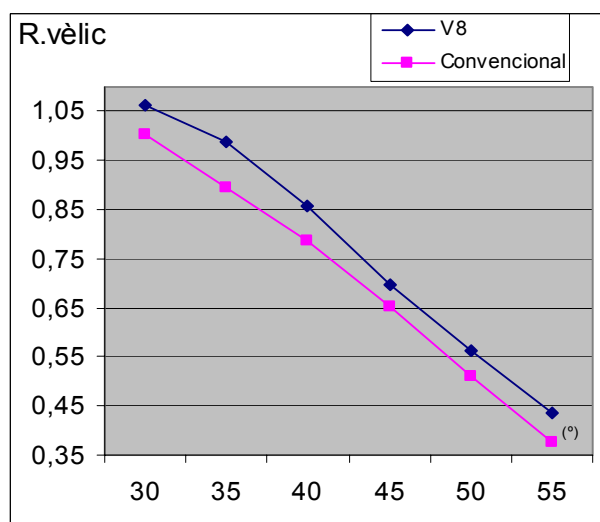


Fig. 7.37: Evolució del rendiment vèlic  $\eta_v$  en funció de  $\alpha$ .





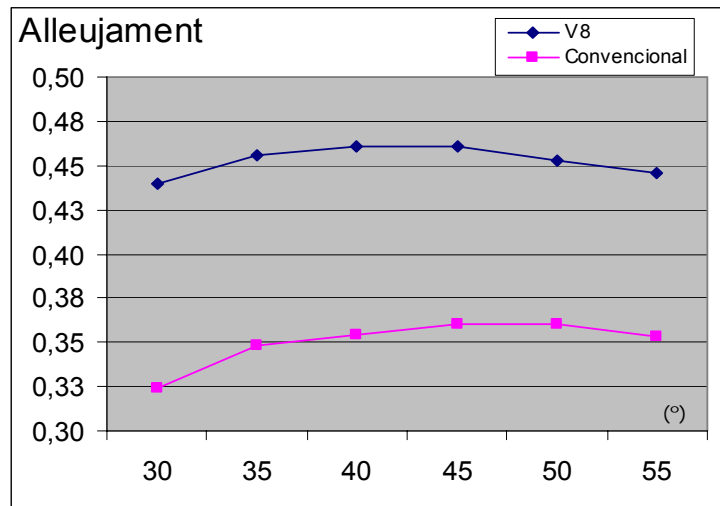


Fig. 7.38: Evolució del rendiment d'alleujament  $\eta_z$  en funció de  $\alpha$ .

Com veiem en el gràfic del rendiment vàlic es pot apreciar que en tot moment hi ha una diferència constant a favor de la vela optimitzada, aquesta millor d'optimització la podem quantificar a més d'un 10% de mitjana, sent els casos amb més angle d'atac on arribem al voltant del 15%. Aquest fet, a primera vista pot sembla insignificant, però cal recordar que estem parlant d'un record del món, que en la majoria dels casos es solen aconseguir millores insignificants però que marquen la diferència. Com a exemple podríem pensar en la F1, doncs trobem cotxes que millorant una mica la càrrega aerodinàmica poden ser decisius al llarg de varies voltes. O bé podríem fer el supòsit que la vela optimitzada fos emprada per en Finian Maynard que va quedar-se a 0,25knot del rècord del món, segurament, amb la millor del 10% ja hagués pogut batre el record fàcilment i establir una marca estratosfèrica, possiblement per sobre dels 50 nusos.

Per altra banda podem veure com encara hem millorat més la vela de velocitat ja que en el rendiment d'alleujament veiem que la vela 8 és claríssimament superior, amb uns valors que arriben a ser, de mitjana un 30% millors. Aquest fet, recordem que faria augmentar la velocitat d'equilibri, o el que és el mateix, aniríem notablement més ràpid.



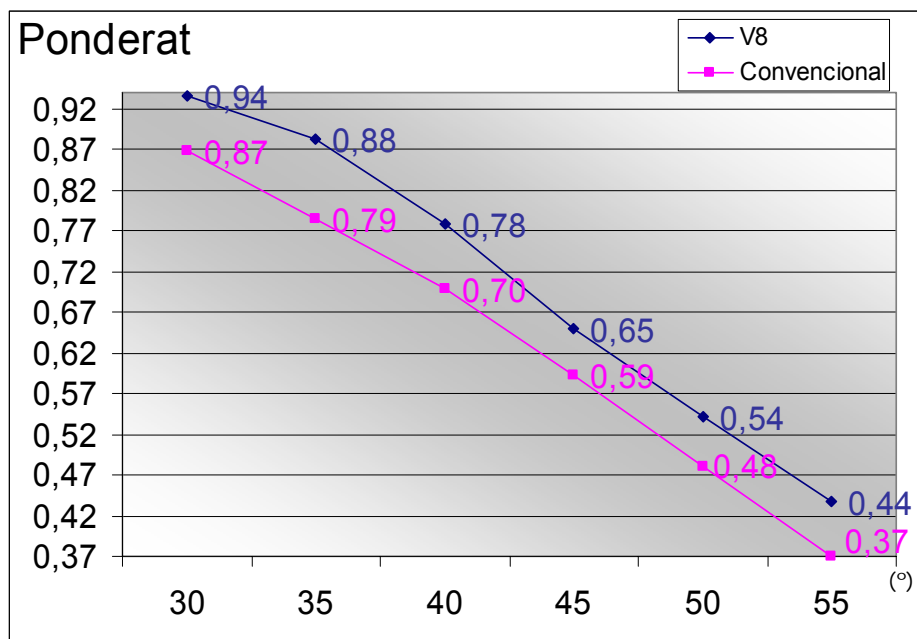


Fig. 7.39: Evolució del rendiment ponderat en funció de  $\alpha$ .

Per tal de deixar més clar i veure la millora de la vela de velocitat tenim la darrera figura, Fig. 7.39, on podem veure com seguim estant per sobre. La diferència, percentual, arriba a una mitjana d'un 12%,.

Finalment podem concloure que s'ha aconseguit optimitzar de forma clara, ja que disposarem, en general, de més força d'empenta, més força ascendent i menys força de deriva, és a dir, hem optimitzat de forma clara i evident les veles actuals de velocitat. A més a més recordem el problema que també s'ha resolt: la vela de velocitat bolcava en angles de 40°-50°, fet que ja no succeirà.

Per altra banda voldríem fer notar que, com s'especifica a l'Annex A, que la vela de velocitat emprada com a vela real és una vela perfilada completament (tot i ser simple), aquest fet és rellevant, donat que les actuals veles de velocitat no presenten un perfilat interior tant important, les més avançades sols presenten un perfilat d'uns 50cm, és a dir un 25% del total del perfil. Aquest fet fa que si s'hagués pogut modelar i simular una vela actual, amb poc perfilat, segurament, els resultats obtinguts amb el model V8 i perfil Selig serien encara més bons.



## 8. Pressupost

Aquest Projecte Final de Carrera té un component molt important de R+D (recerca i desenvolupament) això fa que aquest apartat sigui important, de la mateixa manera succeirà amb els equips informàtics necessaris per al propi desenvolupament amb eficàcia i qualitat.

<b>Software</b>	CATIA v.5R10		1 llicència		7.500 €
	Gambit 2.0		1 llicència		3.500 €
	Fluent 6.1		1 llicència		11.000€
					22.000€
<b>Hardware</b>	P4 3.2GHZ, 1Gb RAM		Cost	Unitats	
	Monitors		1.700 €	2	3.400 €
					485 €
					970 €
					4.370€
<b>Recursos Humans</b>	Eng. Industrial	Especialista mecànic i informàtic	Cost (€/h)	Temps (h)	
	Eng. Industrial	Especialista en mecànica de fluids	12	1056	12.672 €
					12.096 €
					24.768 €
<b>Despeses generals</b>			€/ mes	Mesos	
	Material fungible		180	6	1.080€
	Estudi		500	6	3.000€
					1.000€
					5.080€
<b>TOTAL Costos</b>					<b>56.218€</b>
Benefici Ind.					16% 8.432€
Rec. + Des.					1% 562€
Total sense IVA					65.213€
IVA					16% 10.434€
<b>TOTAL</b>					<b>76.647€</b>

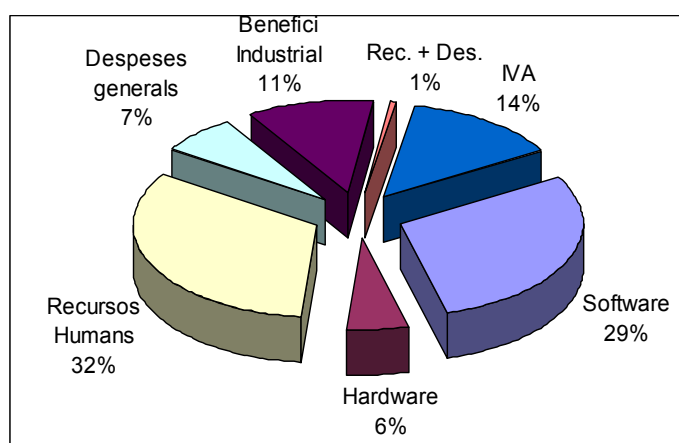


Fig. 8.1: Pressupost global, per partides, del projecte



## 9. Conclusions

Després d'haver realitzat aquest Projecte Final de Carrera, les conclusions són les següents:

- 1) Perfilant aerodinàmicament la vela d'un windsurf s'aconsegueix optimitzar el seu el rendiment.
- 2) Per un mateix vent, les veles perfilades aerodinàmicament generen més empenta i menys deriva que les veles convencionals.
- 3) Els windsurfings amb veles perfilades aerodinàmicament planegen més que els convencionals, reduint així les resistències hidrodinàmiques.
- 4) La navegació òptima s'efectua amb vents al voltant dels 50 nusos. Per vents superiors als 50 nusos, les veles generen forces de deriva impossibles de contrarestar pel pilot.
- 5) Només experimentalment (amb un model real i en les condicions del Canal, i un provador com Finian Maynard o Thierry Bielak) es pot confirmar quantitativament l'abast d'aquest Projecte Final de Carrera.

Valorant qualitativament l'estudi realitzat, podem assegurar que, perfilant aerodinàmicament la vela d'un windsurfing des del pal fins a la baluma:

- El rècord de velocitat a vela és assolible.



## 10. Bibliografia

### 10.1. Referències bibliogràfiques

- [1] JOAQUIM AGULLÓ, *Mecànica de la partícula i del sòlid rígid*. Barcelona: OK punt. 1997
- [2] PHILIPPE VIANNAY, *Cours de navigation des Glenans*, París: Du Compas. 1961. (existeix versió en castellà per Ediciones Tutor SA).
- [3] CLAUGHTON, WELLCOME & SHENOI, *Sailing yacht design theory*, USA: Harlow Longman 1998.
- [4] WHITE FRANK M., *Mecánica de Fluidos*, Barcelona: Mac Graw-Hill cop. 1983.
- [5] ABBOTT, IRA H., *Theory of Wing Sections*, USA: Dover Publications, INC. 1959.
- [6] JOSÉ ANTONIO AGUIRRE BALCELLS, *Una Introducción al estudio de perfiles aerodinámicos y sus aplicaciones al consumo de energéticos*, Barcelona: Limusa, 1984.
- [7] IVES L. PINAUD, *Práctica de la vela*, Barcelona: Hispano Europea. 1976.
- [8] ANIBAL ISIDORO CARMONA, *Aerodinámica y actuaciones del avión*, Barcelona: Thompson Paraninfo . 1997.
- [9] PIJUSH K. KUNDU, IRA M. COHEN, *Fluid mechanics*, USA: Academic Press cop. 2002
- [10] HERRESHOFF, H.C AND J. NEWMAN, *The study of sailing yachts*, USA: Scientific American. 1986.
- [11] BOSSER, J. *Vademécum de mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas*, Barcelona: ETSEIB - CPDA . 1985.
- [12] PRANDTL I TIETJENS, *Fundamentals of hydro and aeromechanics*, New York: Dover Publications. 1934.
- [13] GAMBIT. *Tutorial Guide*, Fluent Inc. May 2000.
- [14] GAMBIT. *User's Guide*, Fluent Inc. May 2000.



- [15] GAMBIT. *Modeling Guide*, Fluent Inc. May 2000.
- [16] GAMBIT. *Command Reference Guide*, Fluent Inc. May 2000.
- [17] FLUENT 6.1 *User's Guide*. Fluent Inc. 25-01-2003
- [18] FLUENT 6.1 *Tutorial Guide*. Fluent Inc. 25-01-2003

## 10.2. Bibliografia complementària

- [19] FRANCESC MASSABÉ MUÑOZ I MARC VILANOVA SERICHOL, *Projecte Final de Carrera: Disseny aerodinàmic i càlcul estructural per a una vela semirígida d'una embarcació lleugera de planeig*, Barcelona: 23/06/1905.
- [20] *FLUENT, Manejo del programa y ejemplos de simulación de mecánica de fluidos*, Universitat de Oviedo, Format ACROBAT.
- [21] Masters Of Speed, [www.mastersofspeed.com](http://www.mastersofspeed.com).
- [22] Aerospace Engineering, Univ. Of Illinois, [www.aae.uiuc.edu](http://www.aae.uiuc.edu).
- [23] Bjorn Dünckerbeck, [www.worldspeedsailing.com](http://www.worldspeedsailing.com)
- [24] Fluent Inc. [www.fluent.com](http://www.fluent.com)
- [25] Nihon Univ. Aero Student Group. [www.nasq.com](http://www.nasq.com)
- [26] Escala de vents. [www.penalosas.com/escala\\_de\\_vientos.htm](http://www.penalosas.com/escala_de_vientos.htm)

