



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Aplicació del BIM a plataformes per a molins de vent flotants. Aplicació al WindCrete

Treball realitzat per:
Miquel Vall Müller

Dirigit per:
Climent Molins Borrell
Pau Trubat Casals

Grau en:
Enginyeria Civil

Barcelona, 27 de setembre de 2022

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU

AGRAÏMENTS

En primer lloc, vull agrair als tutors Climent Molins i Pau Trubat per la dedicació, pels vostres consells i pel vostre suport. Gràcies per haver-me donat l'oportunitat d'introduir-me en l'apassionant món de l'energia eòlica marina i les estructures offshore flotants.

Tampoc podria presentar aquest TFG sense donar les gràcies al professor Mario Fernández. Gràcies pels cursos de formació complementaris que tant ajuden als alumnes i que m'han sigut essencials en el transcurs del projecte.

Per últim, vull agrair el suport d'amics i de familiars. Gràcies per ser-hi i per ajudar-me en aquesta etapa de compaginació entre estudis i feina. En especial, gràcies Claudi.

RESUM

L'energia eòlica marina és una alternativa renovable que es troba en un procés d'expansió significatiu. Això és degut al paradigma actual del desenvolupament sostenible, a causa de la necessitat d'abandonar la dependència energètica envers els combustibles fòssils i per la gran eficiència en l'aprofitament energètic del recurs eòlic marí. El principal paràmetre que incidirà en l'evolució d'aquesta alternativa en els pròxims anys és el cost per la generació de l'energia elèctrica o *Levelized Cost Of Energy* (LCOE).

Aquest projecte estudia l'aplicació del *Building Information Modeling* (BIM) a les plataformes per aerogeneradors flotants, amb la finalitat d'examinar els àmbits on aquesta metodologia pot oferir un valor afegit. Les sinèrgies entre el BIM i l'eòlica marina poden minorar el LCOE i incrementar la seva competitivitat.

En aquesta línia, la recerca investiga diferents mètodes per augmentar l'eficiència en el disseny de les plataformes flotants. Principalment, es desenvolupen tres metodologies per modelitzar paramètricament una subestructura SPAR de formigó armat i pretensat, l'anomenat WindCrete. Es mostra que la forma més apropiada consta de diferents codis Python executats amb Dynamo. Aquests codis defineixen la subestructura, les armadures i els tendons posttesats, obtenint una família paramètrica Revit del WindCrete, amb les propietats hidroestàtiques i els amidaments.

Finalment, es duen a terme diferents anàlisis de les dimensions del BIM. D'una banda, es realitza l'anàlisi 3D amb un estudi de les col·lisions entre el WindCrete i les estructures secundàries. També s'obtenen les seccions constructives amb detalls tridimensionals per facilitar la interpretació del projecte i per reduir potencialment les despeses de manteniment (OPEX). D'altra banda, els amidaments extrets del model BIM, permeten executar l'anàlisi 5D i obtenir un pressupost aproximat del WindCrete desglossat en els diferents materials.

Les eines digitals desenvolupades en aquest projecte poden optimitzar el disseny dels projectes eòlics flotants tipus WindCrete -procés que computa un 4% dels costos d'inversió (CAPEX)-. Aquesta optimització recau en el predimensionament paramètric i en l'obtenció tant del model tridimensional com de la informació associada. Això permet a l'usuari efectuar diferents anàlisis d'alternatives respecte de la geometria i dels materials de l'estructura, del llast i de les armadures.

Paraules clau: *Plataformes eòliques flotants, WindCrete, Building Information Modeling, família paramètrica Revit, optimització del predimensionament.*

ABSTRACT

Offshore wind energy is a renewable energy source in a significant expansion process. This fact is due to the current paradigm of sustainable development, as consequence of the need to abandon the dependence on fossil fuels and the great efficiency of offshore wind resources. The main parameter that will affect the evolution of this energy source in the coming years is the cost for the generation of electricity or Levelized Cost Of Energy (LCOE).

This project studies the application of Building Information Modeling (BIM) to Floating Offshore Wind Platforms (FOWP), specifically focusing on the areas where this methodology offers an added value. The synergies between BIM and FOWP may lower the LCOE of offshore wind energy and raise its competitiveness.

Hence, this research investigates different methods to increase the efficiency in the design of FOWP. Mainly, three methodologies are developed in the present thesis to parametrically generate a SPAR reinforced and prestressed concrete substructure, known as WindCrete. The most suitable method consists of different Python codes executed with Dynamo. These codes define the substructure, the reinforcements and the post-tensioned tendons, resulting in a parametric Revit family of the WindCrete, with the hydrostatic properties and measurements.

Finally, this study carries different analyses of the BIM dimensions. On the one hand, it executes the 3D analysis by means of a clash detection between the WindCrete and the secondary structures. Constructive sections with three-dimensional details are also obtained to facilitate the interpretation of the project and to potentially reduce operational expenses (OPEX). On the other hand, with the measurements extracted from the BIM model, the 5D analysis is executed with an approximate budget for the WindCrete, split into the different materials.

The digital tools developed in this project may optimize the design of WindCrete floating wind projects -a process that accounts for 4% of the investment costs (CAPEX)-. This optimization consists of the parametric pre-dimensioning and the acquirement both of the three-dimensional model and the linked data. This allows the user to carry out different analyses of alternatives with respect to the geometry and materials of the substructure, the ballast and the reinforcements.

Keywords: *Floating offshore wind platforms, WindCrete, Building Information Modeling, Revit parametric family, pre-dimensioning optimization.*

ÍNDIX

1. Introducció	1
2. Objectius	3
3. Metodologia	4
4. Estat de l'art	5
4.1 Consum d'energia actual.....	5
4.1.1 Canvi de paradigma.....	7
4.1.2 Energies renovables.....	7
4.2 Energia eòlica marina.....	11
4.2.1 Plataformes eòliques fixes.....	16
4.2.2 Plataformes eòliques flotants	17
4.2.2.1 Graus de llibertat	19
4.2.2.2 Estabilitat hidroestàtica	20
4.2.2.3 Tipus de plataformes eòliques flotants	21
4.2.2.4 WindCrete	24
4.3 Building Information Modeling	27
4.4 Disseny de plataformes eòliques flotants	31
5. Cas d'estudi: model paramètric BIM del WindCrete	35
5.1 Característiques geomètriques.....	35
5.2 Modelització paramètrica amb Revit	37
5.2.1 Creació de famílies.....	37
5.2.2 Parametrització.....	39
5.2.3 Família paramètrica WindCrete	40
5.3 Modelització paramètrica amb codi Dynamo	45
5.4 Modelització paramètrica amb codi Python.....	48
5.4.1 Estructura WindCrete.....	49
5.4.2 Armadures passives.....	54
5.4.3 Armadures actives	61
5.5 Estructures secundàries	66
5.5.1 Plataforma d'accés	66
5.5.2 Escales.....	68
5.5.3 Turbina	70
6. Resultats: representació gràfica i clash detection (BIM 3D)	72
6.1 Plànols i seccions	72
6.2 Clash detection	77
6.3 Renderitzacions	80

7. Resultats: cost (BIM 5D)	83
7.1 Comparació entre els diferents WindCrete	84
7.2 Comparació entre diferents materials.....	87
8. Conclusions	90
9. Future work	92
10. Bibliografia	93
Annex I. Tipus de plataformes eòliques flotants	99
Annex II. Codi WindCrete.....	103
Annex III. Paràmetres associats al formigó.....	106

1. INTRODUCCIÓ

En el context actual de transició energètica i digitalització industrial s'ha plantejat aquest treball com un estudi i aplicació del Building Information Modeling (BIM) a l'energia eòlica offshore.

En les últimes dècades, els avantatges de la digitalització en les diferents indústries han implicat resultats notoris respecte la productivitat, la seguretat i el desenvolupament tecnològic. Així, el sector de la construcció també està en un procés per optimitzar els processos mitjançant, entre d'altres, la digitalització.

La metodologia BIM ha permès en els últims anys millorar l'eficiència en la planificació, construcció i gestió de les infraestructures. Aquesta metodologia consta d'un conjunt d'eines digitals que permeten modelar tridimensionalment projectes de construcció amb informació associada respecte amidaments, cost, propietats mecàniques dels materials, anàlisi estructural, planificació temporal, procés de construcció i impacte ambiental, entre d'altres. A més, tots els agents de l'obra tenen accés al model BIM per incrementar l'eficiència en la gestió del projecte durant totes les etapes constructives, des de la planificació fins al desmantellament.

Actualment, el BIM es troba en una etapa avançada d'implementació en els projectes d'obra civil i edificació, i tant l'administració com el sector privat treballen per seguir desenvolupant eines digitals per aprofitar els nombrosos avantatges que ofereix aquesta metodologia. Per aquest motiu, resulta interessant plantejar un estudi sobre la implementació del BIM en altres indústries pioneres que comparteixen semblances amb els àmbits d'aplicació actuals.

L'energia eòlica offshore és una alternativa energètica que tracta en l'aprofitament de l'energia cinètica del vent en l'ambient marí per generar electricitat. Aquest sector es troba en un procés de creixement exponencial degut a la gran eficiència energètica del recurs eòlic marí, a la necessitat dels estats d'esdevenir independents energèticament respecte dels combustibles fòssils i al paradigma actual del desenvolupament sostenible. La consolidació de la indústria de l'energia eòlica marina de fonamentació fixa limitada a profunditats de 15 a 60 metres ha obert les portes a idear plataformes flotants amb possibilitat d'arribar a profunditats de fins a 1000 metres.

En l'última dècada s'han dut a terme satisfactòriament diferents pilots de plataformes flotants, i actualment, ja es troben en operació tres parcs eòlics flotants comercials amb un total de 13 aerogeneradors i 105 MW. Es considera que en l'àmbit mundial el 80% de les ubicacions amb gran potencial eòlic s'ubiquen en aigües profundes i d'aquesta manera l'energia eòlica offshore flotant pot permetre l'expansió a gran escala d'aquesta alternativa renovable.

En l'actualitat, la potència instal·lada d'energia eòlica marina consta de 57 GW amb aproximadament 10.000 aerogeneradors, i representa un 7% de l'aprofitament eòlic total. Els principals estats impulsors han desenvolupat aquesta alternativa renovable en aigües someres de la plataforma continental ja que el 99,8% de parcs eòlics són de fonamentació fixa. Es preveu que en els pròxims anys es dugui a terme una expansió a gran escala del sector desencadenada principalment per la minoració del Levelized Cost of Energy (LCOE), degut a l'aprofitament del Know-how d'altres indústries semblants, el desenvolupament tecnològic del sector i la industrialització a gran escala. Així, els diferents estudis i informes anomenats al llarg d'aquest treball estimen que la potència instal·lada d'energia eòlica offshore es tripliqui en els següents 5 anys i computi un 20% de l'aprofitament eòlic total. A més, es preveu que la contribució de les plataformes eòliques flotants s'incrementi en un factor 10 en els següents 5 anys i es multipliqui per 100 al 2030, arribant als 16.500 MW d'energia eòlica offshore flotant a escala mundial.

Els costos econòmics que repercuteixen en la inversió del capital per la infraestructura (CAPEX), i les despeses en l'operació d'aquesta (OPEX), constitueixen el Levelized Cost Of Energy (LCOE), que representa el cost per l'obtenció de l'energia al llarg de la vida útil. Tal com s'ha esmentat, es tracta del principal paràmetre que influirà en l'expansió de l'energia eòlica marina.

El present estudi analitza l'aplicació del Building Information Modeling a l'energia eòlica offshore flotant amb la finalitat d'augmentar l'eficiència en el desenvolupament del projecte mitjançant la digitalització. Actualment, aquesta etapa també anomenada Development and Consent (D&C), comporta un cost que correspon aproximadament al 4% del CAPEX, tractant-se d'una despesa de l'ordre de magnitud d'alguns centenars de milers d'euros per cada aerogenerador marí, depenent principalment de la potència d'aquest.

La implementació de la metodologia BIM es planteja principalment amb el disseny paramètric aplicat a plataformes flotants de tipologia Single Point Anchor Reservoir (SPAR). Específicament l'àmbit d'estudi se centra en l'estructura WindCrete dissenyada per un equip de recerca de l'Escola de Camins a la UPC. Aquesta plataforma tracta d'una estructura vertical formada un cilindre buit pel flotador i una estructura de tronc de con buit per la torre on l'estabilitat hidroestàtica està garantida per la ubicació d'una quantitat òptima de llast a l'interior de flotador. Es tracta d'una alternativa pionera pel seu disseny en formigó armat i pretensat que permet reduir el cost relacionat amb l'estructura en un 60% respecte l'alternativa metàl·lica d'acer estructural.

El disseny paramètric respon a la necessitat d'efectuar una modelització digital eficient respecte les característiques geomètriques del WindCrete. Conseqüentment, modificant les variables d'entrada es poden generar diferents models que permeten extreure informació dels amidaments, el pressupost i les propietats hidroestàtiques. Aquesta eina és especialment productiva en les etapes de predimensionament quan es duen a terme els anàlisis d'alternatives respecte la geometria de l'estructura i dels materials, obtenint les variacions de cost i les propietats hidroestàtiques entre els diferents models. En el context actual d'expansió i desenvolupament tecnològic envers turbines de cada vegada més potència, el disseny paramètric permet variar de forma eficient les característiques geomètriques dels models als requeriments de l'estructura.

Al tractar-se d'una estructura complexa de formigó armat i pretensat amb tendons posttensats, la parametrització ha requerit considerar una gran quantitat de característiques respecte el diàmetre dels diferents armats, la disposició de les armadures passives longitudinals i transversals, les longituds de solapament entre les barres, els recobriments del formigó i la disposició i les longituds dels diferents conjunts d'armadures actives. Tenint en compte totes les característiques esmentades com a variables d'entrada es permet la generació paramètrica tant de l'armadura passiva com de l'armadura activa. A conseqüència de la gran quantitat d'elements que conformen l'armat de l'estructura, les eines de la metodologia BIM permeten dur a terme un *clash detection*, és a dir, la detecció d'interferències, d'interseccions o col·lisions entre els diferents elements. Així, es detecten ràpidament els errors i s'eviten conflictes en etapes més avançades del projecte que suposen despeses inesperades i demores, les principals problemàtiques en la construcció.

Adicionalment, la modelització tridimensional facilita la interpretació de les seccions constructives esdevenint un instrument complementari als plànols i els detalls bidimensionals tradicionals. Alhora el model BIM pot ser exportat al format IFC (Industry Foundation Classes) per garantir la interoperabilitat del model entre els diferents agents involucrats al projecte. Talment, es permet incrementar l'eficiència en el desenvolupament del projecte, on el model compartit proporciona tant la geometria com la informació associada dels materials, el cost, les instal·lacions elèctriques i serveis, cicle de vida, anàlisi estructural, manteniment, etc.

2. OBJECTIUS

A continuació es descriuen els diferents objectius generals que s'han plantejat tant al començament de la recerca com durant desenvolupament del present treball. També es descriuen els objectius específics que detallen i complementen els primers.

Objectius generals

1. Generació d'un model WindCrete paramètric;
2. Creació de l'armadura passiva i activa paramètrica;
3. Inclusió d'estructures secundàries com la plataforma d'accés, turbina, porta o escales;
4. Aplicació de les eines BIM: clash detection, informació dels materials, amidaments i cost;
5. Generació de models i vistes tridimensionals.

Objectius específics

En relació a l'objectiu 1:

- 1.1 Estudiar les característiques de la plataforma WindCrete.
- 1.2 Familiaritzar-se amb el programari comercial de l'entorn BIM, essencialment amb els programes Autodesk Revit i Dynamo; i amb el llenguatge de programació Python.
- 1.3 Parametritzar l'estructura a partir d'unes variables d'entrada geomètriques.

En relació amb l'objectiu 2:

- 2.1 Estudiar les característiques de la disposició de l'armat de l'estructura.
- 2.2 Analitzar les propietats i els requeriments addicionals: recobriments, solapaments.
- 2.3 Crear un codi per generar l'armat de forma paramètrica.

En relació amb l'objectiu 3:

- 3.1 Estudiar les característiques de les estructures secundàries en les plataformes eòliques flotants i familiaritzar-se amb la normativa corresponent.
- 3.2 Modelar les estructures secundàries tenint en compte la correcta unió amb la plataforma.

En relació amb l'objectiu 4:

- 4.1 Realitzar un clash detection o anàlisi de col·lisions.
- 4.2 Obtenir la informació associada tant als amidaments de l'estructura com de les armadures, amb la finalitat d'aconseguir un pressupost.
- 4.3 Crear diferents codis per calcular els principals paràmetres que descriuen el comportament hidroestàtic de la plataforma: el centre de gravetat, el centre de flotació, la inèrcia.

En relació amb l'objectiu 5:

- 5.1 Generar diferents models de la plataforma flotant WindCrete: 100 kW, 2 MW, 5 MW i 15 MW. Extreure la informació associada dels respectius models i comparar-los amb els valors de l'estudi dut a terme per l'equip de recerca.
- 5.2 Crear diverses vistes, seccions i detalls constructius.

3. METODOLOGIA

El procediment que s'ha emprat per dur a terme aquest treball ha constatat d'una recerca de l'estat de l'art del BIM, de l'energia eòlica marina flotant i del disseny de les plataformes eòliques flotants. S'han estudiat les possibilitats d'implementació del BIM al WindCrete, s'han investigat les propietats més rellevants que s'han de considerar en el disseny de les subestructures de molins de vent flotants i s'han analitzat les diferents metodologies per parametritzar aquesta estructura.

Subseqüentment, s'ha dut a terme l'aplicació del BIM al WindCrete mitjançant la parametrització geomètrica de l'estructura de formigó armat i posttesat, i l'obtenció de la informació rellevant respecte amidaments, propietats físiques i hidroestàtiques de la plataforma.

Finalment, s'han extret les conclusions del model BIM segons els objectius establerts i segons la informació obtinguda en la investigació inicial dels potencials avantatges del BIM. A la següent Figura 1 es mostra esquemàticament el flux de treball emprat per desenvolupar el present projecte.

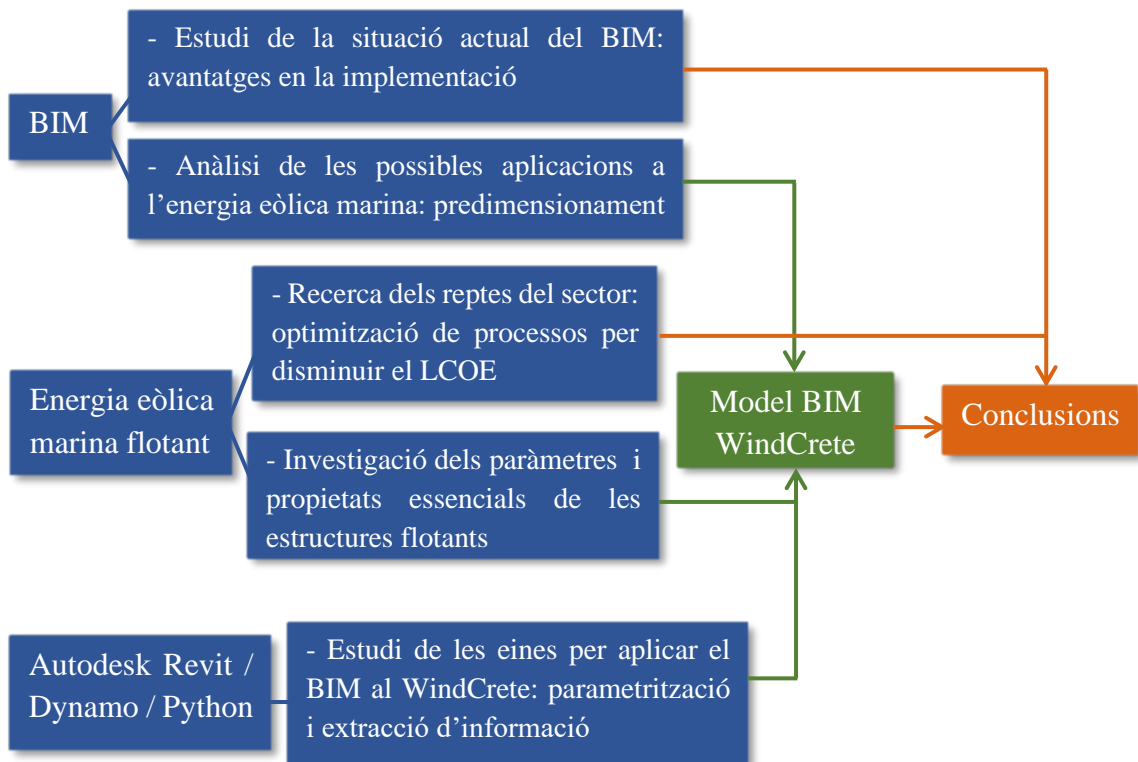


Figura 1. Flux de treball que s'ha emprat en el desenvolupament del treball.

4. ESTAT DE L'ART

En el present apartat es descriu l'estat actual de les diferents temàtiques tractades al llarg d'aquest treball: el paradigma actual del consum energètic, l'energia eòlica marina, el Building Information Modeling i el disseny de les plataformes eòliques flotants. D'una banda es permet contextualitzar al lector dels avenços tecnològics en les respectives indústries per presentar la importància de la digitalització en l'expansió del sector de l'energia eòlica marina. D'altra banda, aquesta recerca introdueix gran part dels conceptes que després s'usaran en el posterior apartat pràctic.

4.1 CONSUM D'ENERGIA ACTUAL

En l'últim segle, el desenvolupament de la societat degut a la globalització, la industrialització i el creixement de la població ha provocat l'increment de la despesa energètica mundial. A la Figura 2 es mostra que l'actual consum d'energia ha augmentat en un factor de 2 respecte al 1980 i un factor de 4 respecte el 1960 [1]. Aquest fet està produint greus conseqüències a la vida del planeta amb l'anomenat canvi climàtic, que implica, entre d'altres, l'increment de la temperatura mitjana mundial, problemes de salut als éssers vius per les emissions de gasos nocius i la contaminació dels ecosistemes.

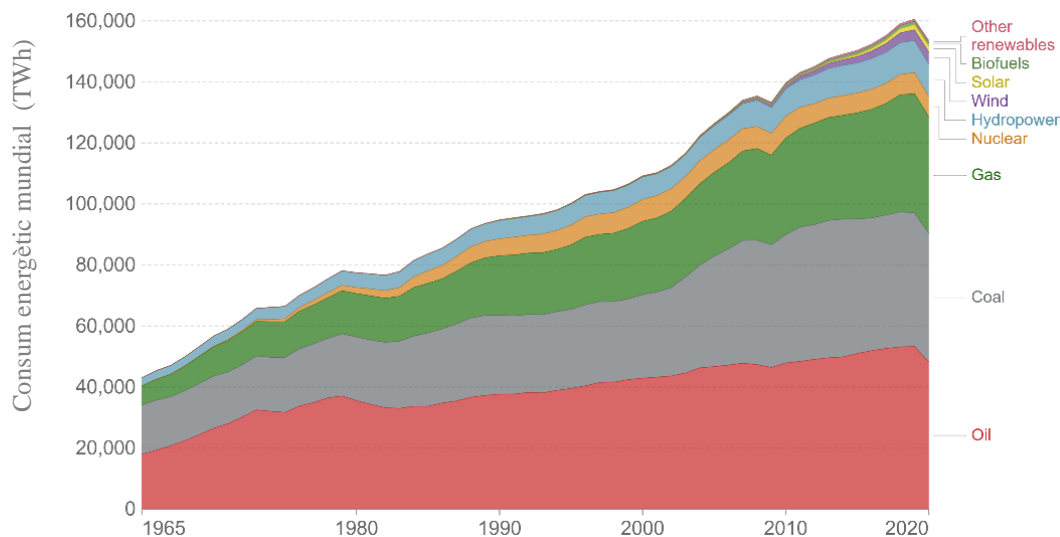


Figura 2. Consum d'energia mundial per cada font d'energia [1].

L'increment de la temperatura mitjana és de les principals conseqüències que s'estan patint amb el canvi climàtic. Aquest fet es produeix degut a l'emissió de gasos d'efecte hivernacle, que retenen la radiació solar dins de l'atmosfera. Aquests gasos són principalment el vapor d'aigua (H₂O), el diòxid de carboni (CO₂), el metà (CH₄), el òxid de dinitrogen (N₂O), l'ozó (O₃) i els gasos clorofluorocarbonis (o CFC) [2].

Diversos estudis apunten a que aproximadament el 70-75% de les emissions de gasos d'efecte hivernacle estan associats a la indústria energètica, principalment per la producció d'electricitat amb combustibles fòssils i en el sector del transport, on s'expulsen grans quantitats de CO₂ [3] [4]. S'il·lustren a la Figura 3 les proporcions del consum d'energia per sector. Per aquesta raó, la producció d'energia renovable és de les línies d'acció que s'estan impulsant de forma més intensa.

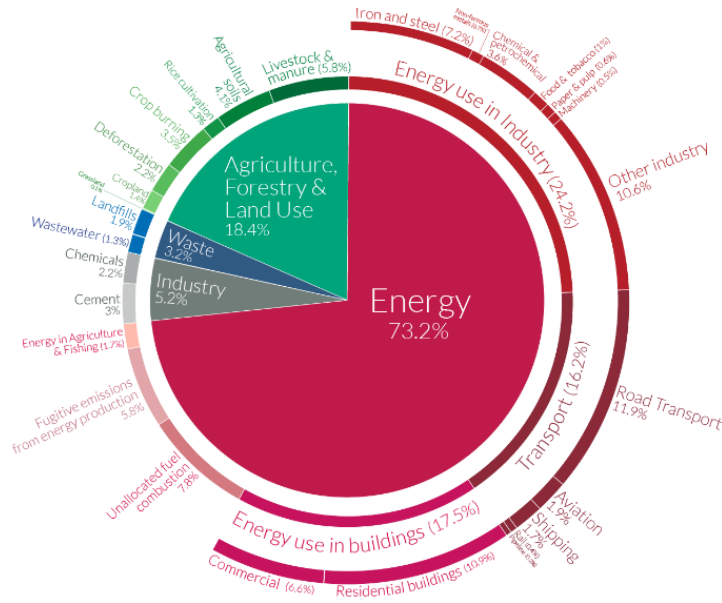


Figura 3. Consum d'energia mundial per sector [4].

Tot i la consciència dels efectes perjudicials de l'emissió d'aquests gasos d'efecte hivernacle, actualment el consum d'energia fòssil és predominant. Tal com s'observa a la Figura 4, on es representa consum energètic per càpita desglossat en les diferents fonts d'energia, mundialment l'energia de fonts no renovables representa aproximadament un 70% del total.

Principalment els països utilitzen carbó, petroli i gas natural per l'abastament energètic. El percentatge del consum d'aquestes fonts d'energies fòssils depèn de la situació de cada país. Els països asiàtics com la Xina, Índia i Indonèsia utilitzen principalment el carbó. Paral·lelament els països dins de la península Aràbiga, el continent americà i Rússia es subministren principalment amb petroli o gas natural degut a les grans reserves.

A la Unió Europea l'ús del carbó també és minoritari i les principals fonts d'energia també són el petroli i el gas natural, els quals s'obtenen principalment per importació. Així el mix energètic es desglossa amb un 71% d'energies fòssils (petroli 36,4%, gas natural 24,8% i carbó 10,7%), amb un 17,9% del consum en energies renovables i un 11,1% de l'energia nuclear. En l'àmbit de les energies renovables destaquen l'energia eòlica i l'energia hidràulica amb un abast similar mentre que l'energia solar actualment representa la meitat del consum de les alternatives anteriors.

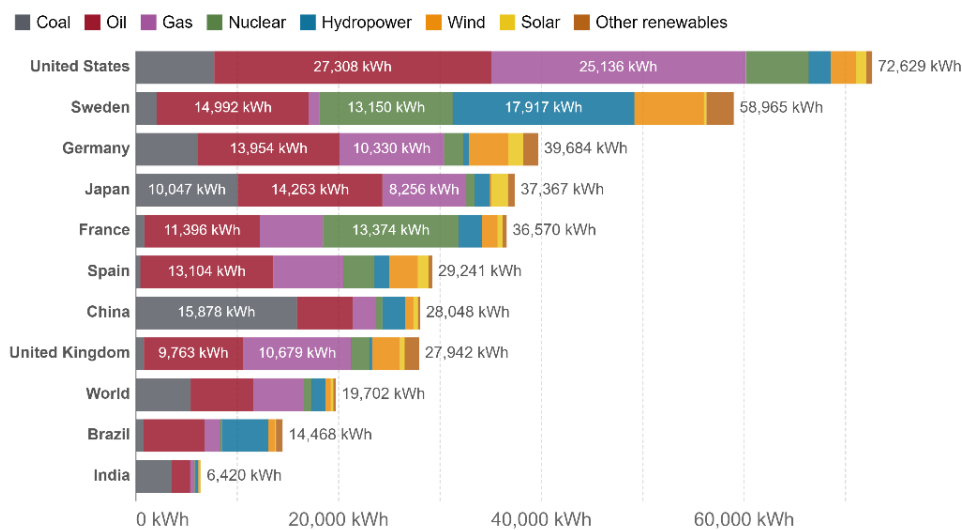


Figura 4. Consum d'energia nacional per càpita i per font d'energia [1].

4.1.1 CANVI DE PARADIGMA

En les últimes dècades, diverses organitzacions, institucions i països s'han compromès a fer esforços per no arribar en un punt on els efectes perjudicials siguin de caràcter irreversible. Les conseqüències dels efectes d'aquest canvi climàtic afecten directament a tots els éssers vius del planeta. Actualment es preveuen diferents escenaris on principalment s'anticipen períodes amb altes temperatures que comportaran sequeres, problemàtiques amb la qualitat de l'aire i la salut, acidificació dels oceans i afectacions tant a la vida terrestre com marina [5] [6].

D'aquesta manera les Nacions Unides han impulsat diversos tractats per reduir aquests efectes del canvi climàtic. En el Protocol de Kyoto (1998) es van establir diverses polítiques per reduir les emissions nocives a l'atmosfera mitjançant l'eficiència energètica, mesures de protecció i desenvolupament d'energies renovables. D'altra banda, 195 països van firmar en l'Acord de Paris (2015) disminuir l'emissió de gasos d'efecte hivernacle per limitar l'augment de la temperatura mitjana mundial a 1,5 °C respecte a nivells preindustrials. Actualment s'estima que la temperatura ja ha augmentat entre 0,8°C i 1,2°C, i si es segueix amb la inèrcia de les energies fòssils predominants és molt probable que es superi el límit establert al 2030 [7].

Els diferents acords internacionals permeten l'establiment d'estratègies per complir uns objectius concrets a llarg termini [8]. Addicionalment, els diferents estats es comprometen a cooperar amb finançament, amb transferència tecnològica i a donar suport als països en vies de desenvolupament que no han participat de forma tant activa en la industrialització de l'últim segle.

En l'àmbit europeu s'ha acordat prendre mesures per estar a l'altura dels esdeveniments i fer front a l'emergència climàtica amb el Pacte Verd Europeu (2020) [3]. Europa ja ha disminuït els gasos d'efecte hivernacle un 23% en les últimes tres dècades mentre que l'economia ha crescut un 60%. L'objectiu més rellevant d'aquest pacte és la reducció dels gasos d'efecte hivernacle fins a un 50% al 2030 respecte la dada del 1990. En conseqüència, es plantegen diferents línies d'acció i un full de ruta perquè els estats membres efectuïn una transició energètica viable i eficient.

La pandèmia del COVID-19 ha causat que els diversos organismes estatals impulsin polítiques per potenciar l'economia. El mercat emergent de les energies renovables ha estat un dels àmbits on s'ha destinat més inversió a fi d'impulsar el desenvolupament econòmic i sostenible. En el Fons Europeu de Recuperació o *Next Generation EU* s'hi destina així un 30% dels 750.000 milions d'euros a la transició climàtica. [9]

Finalment, el canvi de paradigma cap a les energies renovables també està impulsat per la necessitat dels països a esdevenir independents energèticament. Degut al consum majoritari en energies no renovables actualment els països amb menys matèria primera han d'importar grans quantitats de recursos fòssils. En l'àmbit europeu la taxa d'importació energètica és del 58% mentre que a Espanya la dependència energètica representa un 73% [10] [11]. Per tant, l'energia renovable, a part de ser un motor econòmic per impulsar la investigació, la innovació i el mercat laboral nacional, també és essencial per no dependre de la volatilitat dels recursos fòssils degut a l'extracció de recursos limitats, a la cadena de subministrament o a la situació geopolítica.

4.1.2 ENERGIES RENOVABLES

Actualment s'està apostant pel desenvolupament sostenible, és a dir, fomentar el progrés de la societat tenint en compte els efectes sobre el medi ambient [12]. S'ha comprovat en l'últim segle que el desenvolupament de la societat produeix grans efectes positius a la humanitat des del punt de vida del benestar social, cultural i econòmic.

També s'ha comprovat que la industrialització descontrolada ha causat grans danys al medi ambient amb la contaminació atmosfèrica, augment de la temperatura mitja mundial i destrucció d'entorns naturals. Per seguir progressant com a societat i també minorar aquests efectes nocius que afecten directament a la natura i a la humanitat, es vol seguir en la mateixa línia de desenvolupament afegint la consideració de l'impacte de les diverses accions al medi ambient.

Amb l'informe anual de l'agència internacional de l'energia (IEA) [13], es constata que en els últims anys hi ha una clara tendència de creixement en les energies renovables. L'energia provinent de les centrals hidroelèctriques ha estat l'alternativa renovable predominant durant el segle XX. La falta d'ubicacions on l'energia produïda pel recurs hidràulic sigui competitiva i els alts costos d'inversió han causat que el seu creixement no sigui tant pronunciat.

Altrament, com s'il·lustra a la següent Figura 5, les diverses alternatives com l'energia solar i eòlica estan en un procés d'expansió molt més accelerat. A Europa, mentre que en l'última dècada la producció total d'energies renovables ha augmentat de l'ordre d'un 70%, l'energia solar i eòlica han experimentat un creixement del 300%.

D'aquesta forma s'espera que en els següent 5 anys la capacitat instal·lada d'energies renovables mundial incrementi un 60%, sobretot per l'expansió a gran escala de projectes d'energia solar, on s'estima que es duplicarà la potència instal·lada actual en aquest període. S'estima també que l'energia eòlica comptarà amb una expansió significativa amb increments del 50% en el cas de l'eòlica terrestre i 240% en el cas de l'aprofitament eòlic en l'ambient marí. Tal com s'observa a la següent Figura 5, aquests increments en la generació d'energies renovables implicaran que, mundialment, al voltant el 35% de l'energia generada serà renovable.

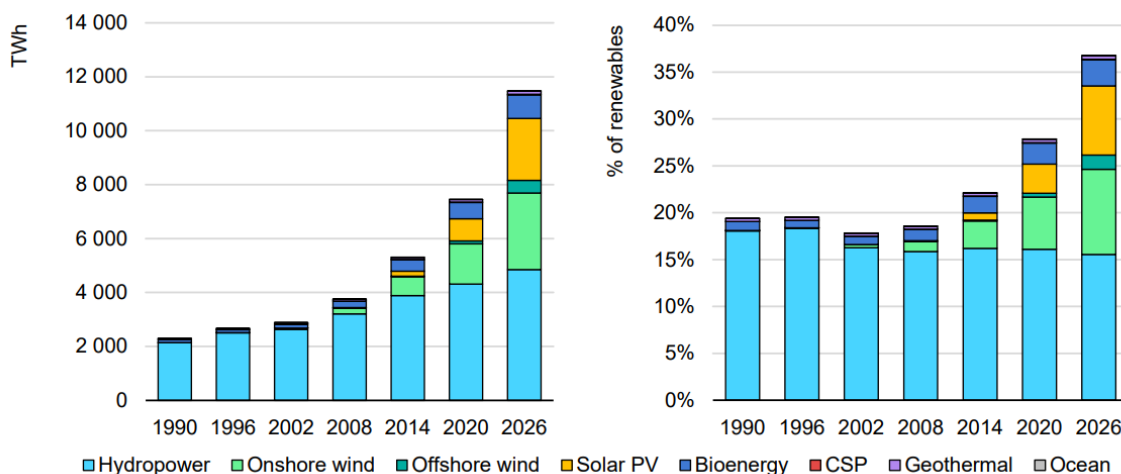


Figura 5. Evolució de les energies renovables mundialment en termes d'energia consumida (esquerra) i en termes de la proporció segons el consum energètic total (dreta) [13].

Tot i així, les principals inseguretats de l'expansió renovable són la incertesa en el compliment de les polítiques establertes pels estats, les problemàtiques d'implementació per motius administratius i econòmics, l'acceptació social i els elevats costos d'inversió degut a l'increment dels preus en les matèries primeres.

No obstant, l'augment de les energies renovables és indiscutible tant pels grans esforços econòmics per part dels estats com pel desenvolupament tecnològic del sector privat. La gran competitivitat econòmica que presenten les energies renovables, la innovació tecnològica en àmbits pioners i la independència energètica també són factors que demostren el gran recorregut que presenten aquestes alternatives.

D'aquesta forma, com es mostra a la Figura 6, ja hi ha diversos països capdavanters en la producció d'energies renovables on la dependència fòssil és minoritària. Islàndia, Noruega i Suècia van comptar al 2020 amb un consum d'energia renovable respectivament del 83,7%, 77,4% i 60,1% [1] [14] [15]. L'aprofitament d'energia en aquests països es produeix principalment mitjançant centrals hidroelèctriques mentre que l'energia eòlica i geotèrmica es troben en un procés de creixement accelerat.

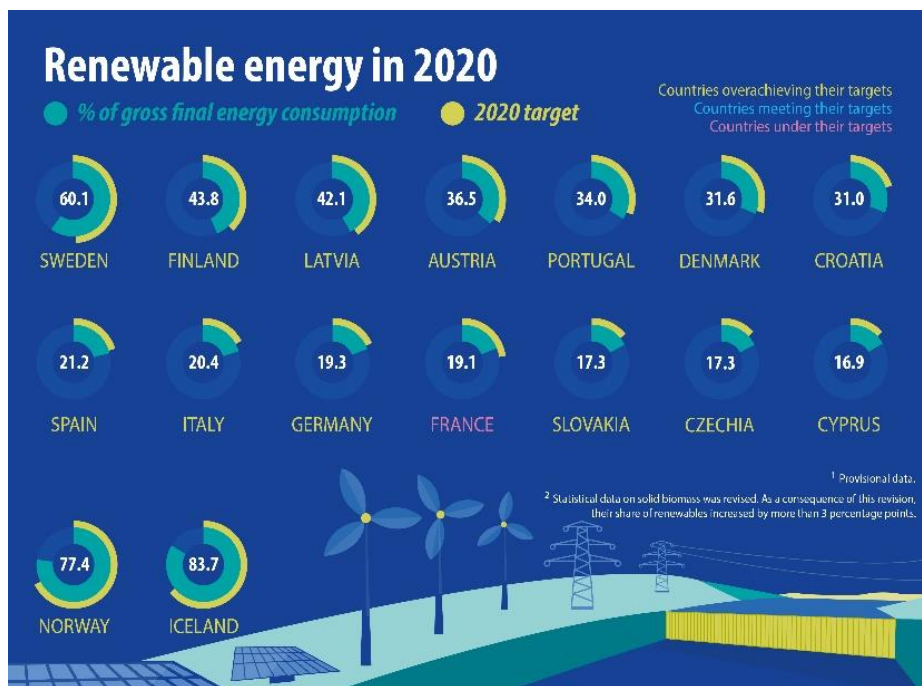


Figura 6. Consum d'energia renovable dels diferents països europeus [14].

Per avaluar la competitivitat de les diferents alternatives energètiques s'utilitza el Levelized Cost Of Energy (LCOE). Aquest paràmetre consta del conjunt de costos econòmics que repercuteixen al promotor en l'obtenció de l'energia que genera una infraestructura al llarg de la seva vida. És una de les variables de decisió en els projectes energètics, ja que representa la viabilitat econòmica de la inversió. El LCOE es compara amb el preu al que es pot vendre l'energia elèctrica al mercat i la diferència entre les dues magnituds és el benefici econòmic.

Es calculen així els costos d'inversió (CAPEX) i els costos d'operació (OPEX) que repercutiran al llarg de la vida útil al promotor respecte l'energia elèctrica generada en aquest termini [16]. L'energia generada i els costos es calculen de forma anual i al tractar-se d'infraestructures amb una vida útil significativa es considera també la taxa de descompte (r) i la inflació.

$$LCOE = \frac{\text{costos durant el cicle de vida}}{\text{energia elèctrica generada}} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{CAPEX_0 + OPEX_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

D’una banda, els CAPEX engloben les despeses fixes i variables que compten amb la inversió del capital, és a dir, les matèries primeres, el desenvolupament del projecte, els costos de finançament, desmantellament de la infraestructura, etc. D’altra banda, els OPEX integren les despeses associades a l’operació del sistema, és a dir, les despeses d’exploració i manteniment.

En el cas de les energies no renovables també es necessita considerar, dins de la despesa d’exploració (OPEX), el cost de la matèria prima que s’utilitza per generar l’energia, un paràmetre variable degut a la volatilitat d’un mercat amb recursos limitats. A més, en el marc de les diferents mesures per impulsar polítiques de reducció de gasos d’efecte hivernacle, també es preveu un increment del cost per l’emissió de carboni. Així, en el cas de les energies renovables ambdós dels últims costos esmentats no apliquen i ofereixen una competitivitat econòmica afegida.

En els últims anys, la indústria energètica ha patit un decreixement força generalitzat dels costos de l’energia tal com s’evidencia a la Figura 7 [17] [18]. L’obtenció d’energia elèctrica mitjançant energies fòssils com el gas i el carbó han patit descensos en el LCOE entre el 12% i el 38%. Altrament, els costos per obtenir energia elèctrica mitjançant centrals nuclears han augmentat un 36% en els últims 11 anys. No obstant, les energies renovables com l’energia eòlica offshore, l’energia eòlica onshore i l’energia solar fotovoltaica, han disminuït dràsticament el LCOE en el període 2010-2020 amb variacions del 48%, 56% i 85%, respectivament. Aquestes variacions es deuen a que són tecnologies pioneres i en els últims anys la indústria ha estat transformant-se.

D’aquesta forma, actualment les energies renovables tenen un cost de la generació d’energia molt competitiu en el mercat i diverses alternatives renovables presenten un cost menor respecte solucions no renovables tradicionals. Aquest és el cas de l’energia solar a gran escala i l’energia eòlica onshore, les quals presenten costos repercutibles a la generació d’energia elèctrica considerablement inferiors a energies tradicionals com el gas natural, l’energia nuclear o el carbó.

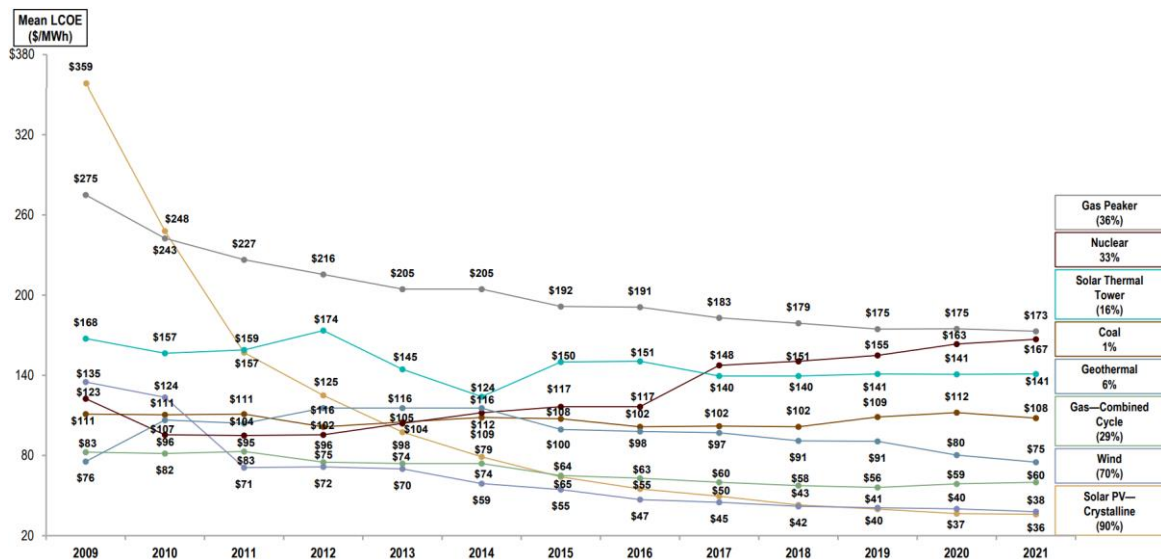


Figura 7. Evolució del LCOE en les fonts d’energia mundialment [18].

4.2 ENERGIA EÒLICA MARINA

L'energia eòlica marina es basa en l'aprofitament energètic del recurs eòlic en zones marines o offshore mitjançant una turbina d'eix horitzontal. En l'última dècada aquesta energia renovable (en blau a la Figura 8) ha tingut una tendència d'expansió exponencial degut a la consolidació de l'energia eòlica terrestre (en verd a la Figura 8) i a la gran eficàcia en l'aprofitament del recurs eòlic marí. L'any 2021 s'han instal·lat mundialment 21 GW de potència eòlica offshore, triplicant el valor de l'any anterior i constituint 57 GW de potència acumulada. En els últims cinc anys s'ha duplicat la potència acumulada i en l'última dècada aquesta xifra ha augmentat en un factor de 13. Així, en els últims 10 anys la capacitat instal·lada ha incrementat un 31% anualment [19].

En l'actualitat, l'energia eòlica marina representa un 7% de l'aprofitament eòlic total i s'estima que en els següents anys computi un 20%. Amb la implementació a gran escala als països emergents en aquesta indústria com els Estats Units, Corea, Vietnam o països europeus com França, s'espera que en els següents 5 anys es tripliqui la capacitat acumulada actual [13] [20].

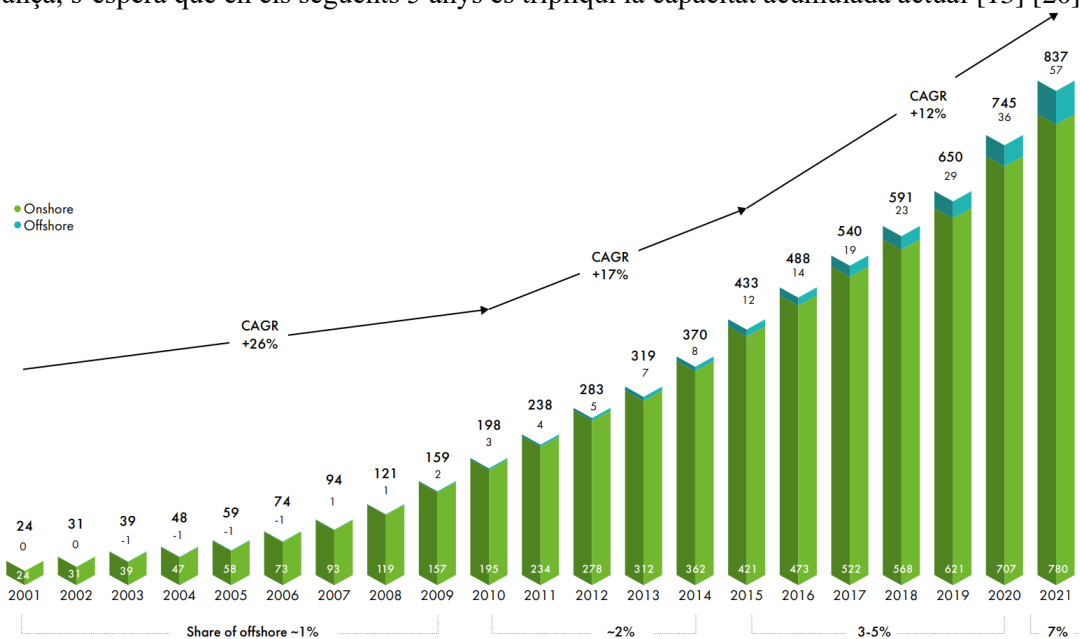


Figura 8. Evolució de l'energia eòlica terrestre (verd) i marina (blau) [19].

L'any 2020 els 3 països líders en aprofitament eòlic marí representaven el 79% de potència offshore acumulada: el Regne Unit, la Xina i Alemanya respectivament. La capacitat instal·lada als països del continent europeu computava un 70% de la potència mundial degut a la àmplia expansió de parcs eòlics marins situats a la plataforma continental del Mar del Nord.

A llarg termini, per tal d'aconseguir amb els objectius dictats al Pacte Verd Europeu, es planteja augmentar els 28 GW actuals d'eòlica offshore europea fins a 60 GW al 2030 i 300 GW al 2050. Alhora els Estats Units, on l'indústria de l'eòlica marina està en una situació emergent, té fites ambicioses amb la implementació de 30 GW al 2030. També s'espera un increment important als països líders actuals en l'expansió de l'energia eòlica marina (Figura 9) degut a l'experiència i la consolidació del sector. Per exemple el Regne Unit, capdavanter actualment, planteja un creixement de la capacitat eòlica marina en un factor de 4 al 2030, aconseguint així 40 GW de potència [21]. A l'estat espanyol s'estableix l'objectiu d'aconseguir al 2030 de 1 GW a 3 GW, representant un 15-40% de l'objectiu europeu envers les plataformes flotants [22].

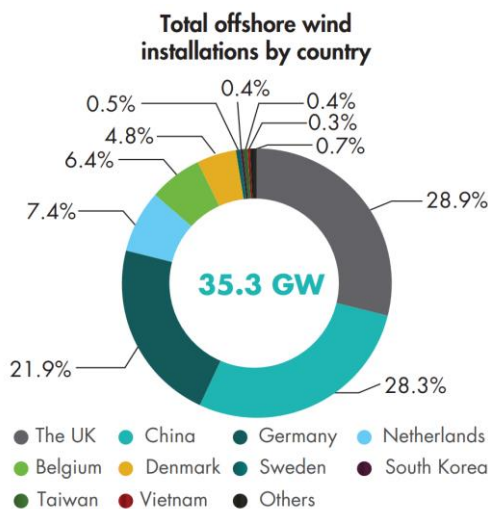


Figura 9. Potència acumulada d'energia eòlica marina mundial l'any 2020 [23].

El principal valor afegit de l'energia eòlica marina és la possibilitat d'augmentar la capacitat dels aerogeneradors degut a les característiques del recurs eòlic marí. D'una banda, als mars i oceans el vent té una velocitat mitja superior que a la superfície terrestre per les corrents marines. D'altra banda, l'absència d'obstacles proporciona alhora una superfície amb menys rugositat superficial disposant així d'un vent amb règim més laminar [22]. La menor turbulència implica un factor de cisallament més baix i s'obté un perfil de velocitats més regular amb l'altura. Les zones terrestres amb recurs eòlic competitiu a 100 metres d'altura tenen velocitats mitjanes de 6-8 m/s mentre que en l'ambient marí s'incrementa a 8-10 m/s, duplicant la densitat de potència de la turbina [24].

D'aquesta forma s'aconsegueix una major energia cinètica del vent a menor altura i es permet la reducció de l'altura de la torre i l'augment de la potència de la turbina respecte l'alternativa terrestre. De tal manera, en l'actualitat, la potència mitjana dels aerogeneradors marins (8,5 MW) duplica a la capacitat en la superfície terrestre (4 MW) [25].

A més, s'ha demostrat que el recurs eòlic marí és més constant, proporcionant factors de capacitat més elevats i essent una clara avantatge respecte l'eòlica terrestre. El factor de planta (també anomenat factor de capacitat) representa la ràtio d'aprofitament energètic, és a dir, el quocient entre l'energia generada en un període de temps i l'energia que s'hagués produït si el generador hagués funcionat a càrrega completa. Al 2018 l'aprofitament del recurs eòlic avaluat amb el factor de planta va ser del 22% al 43% en el cas de l'eòlica terrestre mentre que a l'ambient marí aquesta xifra pujava a intervals del 29% al 52%. Actualment, els nous parcs eòlics marins ofereixen factors de capacitat del 40-50% [23] [26].

Els parcs eòlics offshore flotants situats a grans distàncies de la costa amb potencial eòlic més significatiu, aprofiten més aquest recurs eòlic i obtenen factors de planta més elevats. L'eficiència de l'eòlica flotant s'ha demostrat amb el primer projecte eòlic flotant anomenat Hywind Scotland, on l'aprofitament energètic del vent es produeix amb un factor de planta del 57% [23].

Alhora la continuïtat del vent i la possibilitat de produir energia en situacions meteorològiques adverses on l'energia solar no és tant eficient suposa que l'eòlica marina esdevingui una bona alternativa per la diversificació i compaginació entre les diverses energies renovables. Per tal d'emmagatzemar l'energia generada, s'estan explorant les sinèrgies entre l'aprofitament del recurs eòlic marí amb la producció d'hidrogen mitjançant l'electròlisi [22].

Tal com es representa a la Figura 10, l'ambient marí és on el recurs eòlic presenta una major velocitat i, respectivament, proporciona una major densitat de potència. A més, la velocitat del vent varia amb l'altura degut al fregament amb la superfície terrestre i la densitat de l'aire. Aquesta variació es produeix amb una llei logarítmica o exponencial, i així augmentar l'altura implica obtenir un recurs eòlic més significatiu [27]. D'aquesta forma, a fi d'aprofitar més eficientment aquest recurs i optimitzar els costos de la subestructura i del cablejat, cada vegada s'estan produint turbines a més alçada, de més grandària i, respectivament, de més capacitat. A principis de segle, les turbines més emprades tenien capacitats de 2 MW, al cap d'una dècada es va arribar als 7 MW i a partir del 2024 es produiran turbines de fins a 15 MW [21] [26].

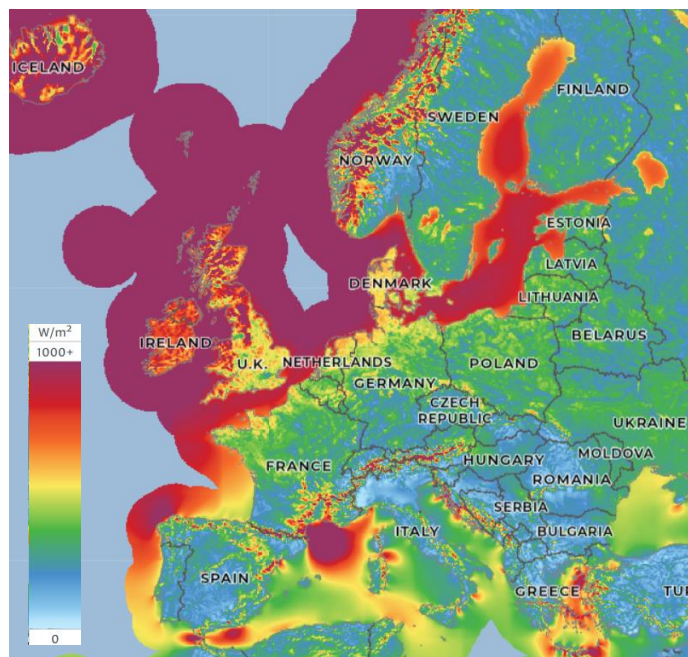


Figura 10. Densitat de potència al continent europeu [24].

L'augment de la capacitat de les turbines eòliques offshore i els factors de potència més elevats degut a la gran energia cinètica i continuïtat del recurs eòlic marí, permeten que els aerogeneradors marins generin més electricitat. Aquest fet implica una davallada del LCOE i s'augmenta la competitivitat econòmica dels projectes eòlics offshore. L'energia eòlica marina, al tractar-se d'una tecnologia pionera d'aquest segle XXI, és de les energies que ha presentat més variabilitat del LCOE amb una disminució del 48% en els últims 10 anys. Actualment a nivell mundial és una de les alternatives més eficients amb una mitjana de 84 €/MWh, i se situa al mateix ordre de magnitud que l'eòlica terrestre amb 36 €/MWh, l'energia solar fotovoltaica amb 54€/MWh i les energies tradicionals com el carbó 102 €/MWh, les turbines de gas de cicle combinat 56 €/MWh i l'energia nuclear 158 €/MW [17] [18].

A més, diferents estudis [20] [28] apunten a una reducció de costos encara més pronunciada degut a l'expansió generalitzada i al *Know-how* de l'energia eòlica terrestre. Actualment el sector s'està transformant per disminuir els costos en el disseny, obtenció de permisos, construcció, transport, manteniment i retirada o reciclatge de les estructures. S'estima que degut a la maduració de la indústria, l'economia d'escala i l'emplaçament de parcs eòlics a localitzacions a més distància de la costa (i amb recurs eòlic de més potencial) implicarà que el LCOE disminueixi al 2050 un 40% respecte del valor actual en el cas de les estructures flotants i un 49% en el cas de les subestructures fixes.

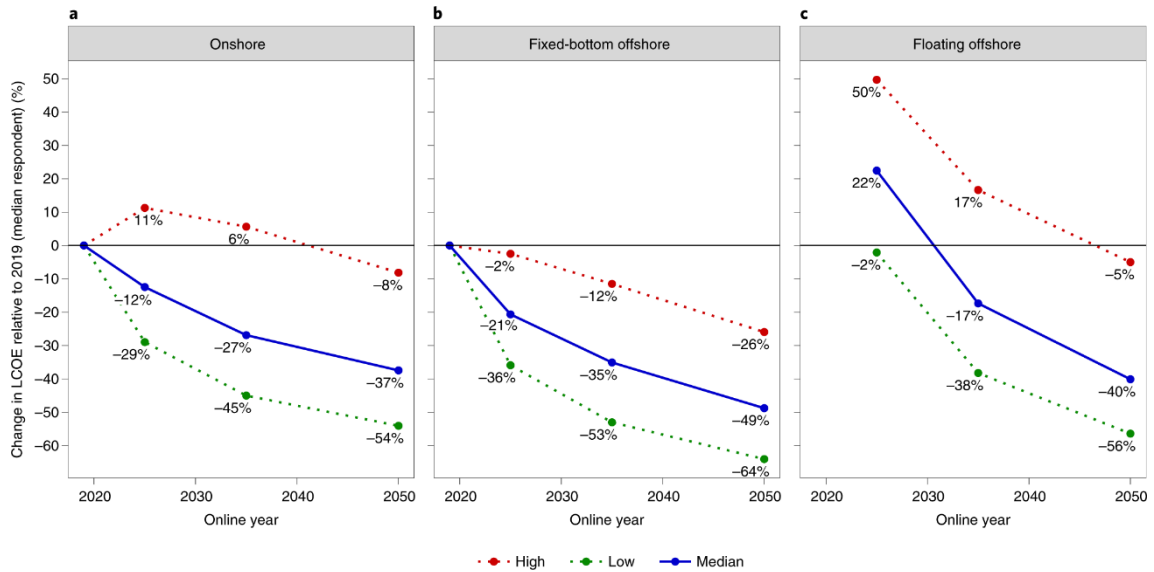


Figura 11. Transformació del LCOE en les diferents tipologies d'energia eòlica en l'àmbit mundial [28].

Per conèixer les variables de decisió a l'hora d'emplaçar un parc eòlic marí, és important entendre com es genera l'electricitat a partir del vent. La producció d'energia elèctrica mitjançant el recurs eòlic es produeix amb el moviment de les pales de l'aerogenerador degut a l'energia cinètica del vent. Les pales es mouen gràcies a les forces de sustentació produïdes per la diferència de pressions degut a la seva geometria corba i transmeten el moviment giratori al generador. Combinant la fórmula de la potència de l'energia cinètica i l'equació de continuïtat de la mecànica de fluids, s'obté la potència generada en una turbina eòlica [29]:

$$P = \frac{1}{2} \rho_a A_{rotor} C_p(\lambda, \beta) v^3$$

on ρ_a és la densitat de l'aire, A_{rotor} és l'àrea escombrada per les pales, C_p és el coeficient de potència i v representa la velocitat del vent.

L'exponent cúbic de la velocitat comporta que la producció d'energia depengui principalment del perfil de velocitats del vent (Figura 12), el qual augmenta amb l'altura respecte la superfície terrestre. Mitjançant l'àrea escombrada en el moviment circular de les pales, el diàmetre d'aquestes també afecta proporcionalment a la potència generada amb un exponent quadràtic.

El coeficient de potència C_p es defineix com la ràtio de la potència generada per la turbina entre la potència eòlica que entra a la turbina o potència disponible [30]. Representa així l'eficiència aerodinàmica en una turbina eòlica de flux obert, és a dir, l'eficiència en la transformació de l'energia cinètica del vent en energia mecànica al rotor. Aquest paràmetre depèn de la velocitat de les pales mitjançant el *Tip Speed Ratio* i de l'angle de capcineig (o *pitch*) de les pales. El físic alemany Albert Betz va demostrar al 1909 que la màxima eficiència que es pot aconseguir en una turbina eòlica de flux obert era del 59,3%, l'anomenat límit de Betz. Actualment les turbines en el mercat aconsegueixen arribar a coeficients de potència d'aproximadament un 60-75% del límit de Betz.

La densitat de potència és un dels paràmetres de decisió en l'anàlisi per emplaçar un parc eòlic, ja que té en compte la potència del recurs eòlic independentment de la turbina instal·lada. Aquest paràmetre és la potència generada per una turbina eòlica per metre quadrat i s'expressa en W/m^2 .

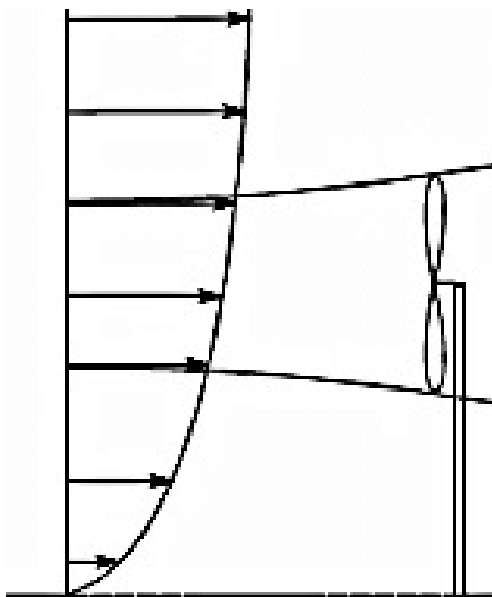


Figura 12. Perfil de vent actuant a un aerogenerador [31].

Actualment hi ha dos tipus d'estructures on romanen els aerogeneradors marins i en garanteixen tant l'estabilitat com la posició: les plataformes fixes (*Bottom-fixed structures*) i les plataformes flotants (*Floating Offshore Wind Turbine platforms* o *FOWT platforms*).

La gran majoria de la capacitat eòlica marina instal·lada és de fonamentació fixa, és a dir, la subestructura transmet les càrregues al subsol marí. Dels principals avantatges és que aquesta tecnologia ha estat àmpliament utilitzada i el sector té una experiència extensa en el seu disseny, construcció, transport i operació. No obstant, el gran potencial del recurs eòlic a profunditats on la fonamentació fixa deixa de ser competitiva i el desenvolupament de les tecnologies del sector de l'eòlica offshore, han obert les portes a les plataformes flotants ancorades al subsol marí mitjançant amarres.

L'any 2019 dels 29 GW acumulats de potència eòlica marina mundial i 5256 aerogeneradors marins només 7 eren flotants [32]. A finals del 2021, amb 57 GW acumulats, s'ha duplicat el nombre de turbines flotants arribant a una potència de 105 MW (excloent els projectes pilots de menys de 10 MW) [33]. En els següents 5 anys s'espera que els parcs eòlics flotants arribin als 1.200 MW de capacitat acumulada mundial i als 16.500 MW per l'any 2030 [23].

Actualment hi ha 3 parcs eòlics flotants comercials: Hywind Scotland (Regne Unit, 30 MW), WindFloat Atlantic (Portugal, 25 MW) i Kincardine (Regne Unit, 50 MW). Durant el 2022 s'acabarà d'instal·lar el parc eòlic Hywind Tampen (Noruega, 88 MW) [33].

4.2.1 PLATAFORMES EÒLIQUES FIXES

Per motius de viabilitat tècnica i econòmica, l'ús de la fonamentació fixa es limita a profunditats de 40 metres i excepcionalment a profunditats fins a 60 metres. En conseqüència, a les ubicacions situades a la plataforma continental, es poden emplaçar parcs eòlics offshore a una distància considerable tenint una afectació mínima a la costa. Aquest és el cas del Mar del Nord o de l'oceà Atlàntic (Figura 13), on gran part d'aquestes zones marines estan situades a la plataforma continental. Per aquesta raó, el 70% dels parcs eòlics offshore es situen al continent europeu.

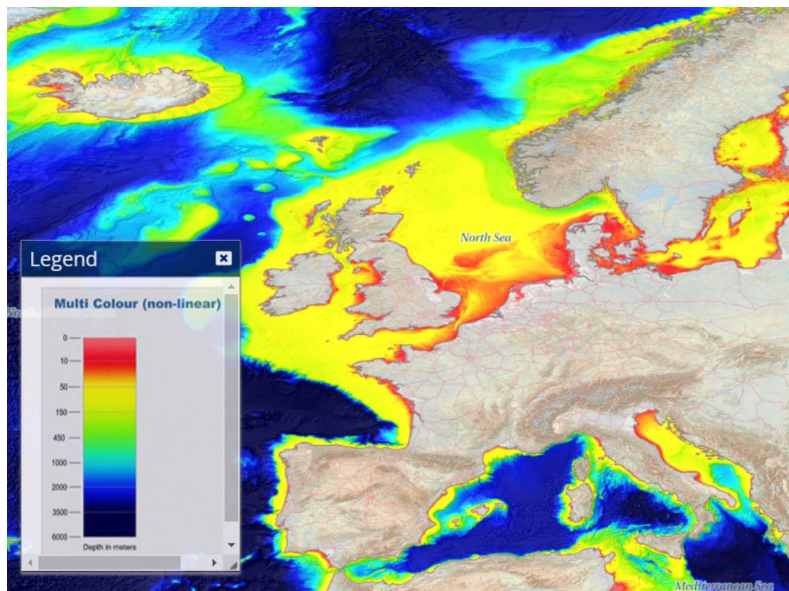


Figura 13. Batimetria al continent europeu [34].

Dins d'aquestes estructures de fonamentació fixa s'hi distingeixen quatre tipus [22] [32] [35]:

- **Base de gravetat** (*Gravity based*)

La base de gravetat és una fonamentació que és viable pel suport d'aerogeneradors situats en aigües someres de 15 metres però es pot arribar a utilitzar fins a profunditats de 60 metres. Consisteix en una plataforma de formigó armat que roman al fons marí, garantint l'estabilitat estructural únicament mitjançant el pes propi de l'estructura.

- **Mono-piló** (*Monopile*)

Aquesta solució s'utilitza també en aigües someres per aguantar turbines eòliques situades a profunditats entre 15 i 30 metres de profunditat. La geometria és senzilla i consta d'un cilindre metàl·lic buit clavat al subsol marí per transmetre la càrrega mitjançant el fregament al fust i, si el terreny ho permet, per punta. És l'alternativa més emprada en l'eòlica marina amb gran diferència, el 81% de les plataformes instal·lades fins al 2019 feien servir aquesta estructura.

- **Trípode** (*Tripod*)

Les fonamentacions fixes de tipus trípode generalment consten d'una estructura metàl·lica lleugera amb tres punts d'ancoratge al fons marí. Aquestes plataformes s'utilitzen en profunditats on les dues alternatives anteriors deixen de ser competitives (20-50 metres). El menor nombre de seccions provoca que aquestes requereixin de majors dimensions i, respectivament, major rigidesa per proporcionar l'estabilitat estructural. Per consegüent, aquesta alternativa presenta un menor nombre de connexions i s'obté menys sensibilitat als fenòmens de fatiga i corrosió.

○ **Gelosia (Jacket):**

En profunditats més elevades (a partir dels 30 metres) les estructures metàl·liques en forma de gelosia guanyen competitivitat degut a la seva lleugeresa relativa respecte a les altres solucions. Aquestes estructures consten d'un gran nombre de seccions unides en gelosia. Aquestes fonamentacions estan ancorades al subsol marí i són més complexes i restrictives a les accions cícliques i als agents externs del medi marí degut al gran nombre d'unions. Aquesta solució ha àmpliament estat emprada en les últimes dècades a les plataformes d'extracció de gas o petroli.

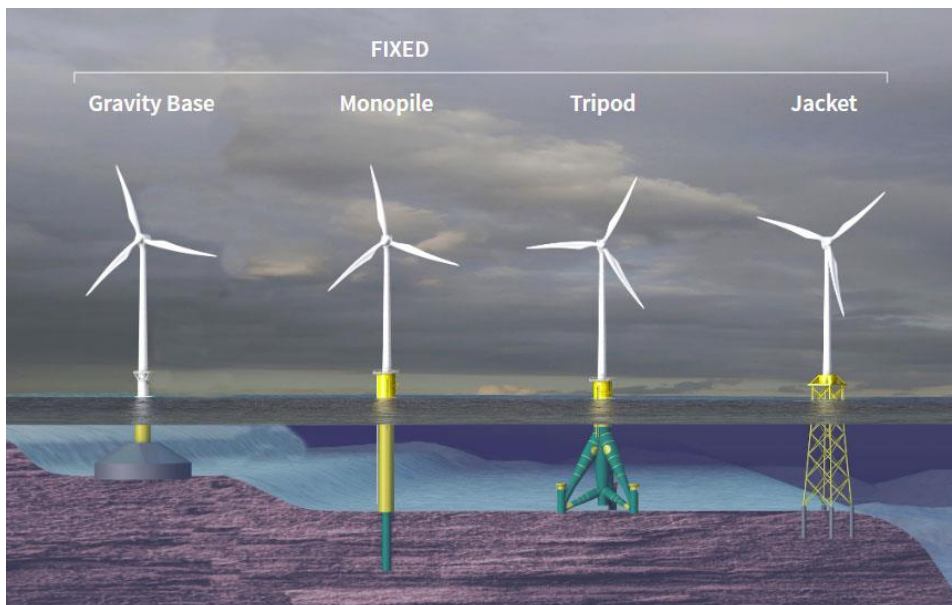


Figura 14. Tipus de fonamentacions fixes per aerogeneradors marins [36].

4.2.2 PLATAFORMES EÒLIQUES FLOTANTS

El progrés tecnològic de la indústria de l'eòlica marina de la última dècada obre les portes a un ampli ventall de localitzacions amb recurs eòlic significatiu situades a grans distàncies de la costa. El paradigma actual del sector es basa en l'expansió a aquestes ubicacions per aprofitar l'energia cinètica de vent de forma més eficient (Figura 15). La principal limitació a emplaçar parcs eòlics a aquestes distàncies és la necessitat d'emprar grans fonaments fixes degut a un augment de la profunditat significativa.

En l'àmbit mundial s'estima que el 80% d'ubicacions amb gran potencial de recurs eòlic marí s'ubiquen a localitzacions amb profunditats on l'ús de fonamentacions fixes no seria viable econòmicament ni tècnicament [23]. Per expandir l'eòlica marina a aquestes ubicacions fora de la plataforma continental i obtenir una major eficiència en l'aprofitament de l'energia del vent, s'ha optat per emprar plataformes eòliques flotants (Floating Offshore Wind Turbines o FOWT).

A sobre d'aquestes plataformes o subestructures s'hi ubica la torre que subjecta les pales (que s'uneixen a la caixa o rodet) i la turbina eòlica o gòndola amb la transmissió, el fre i el generador.

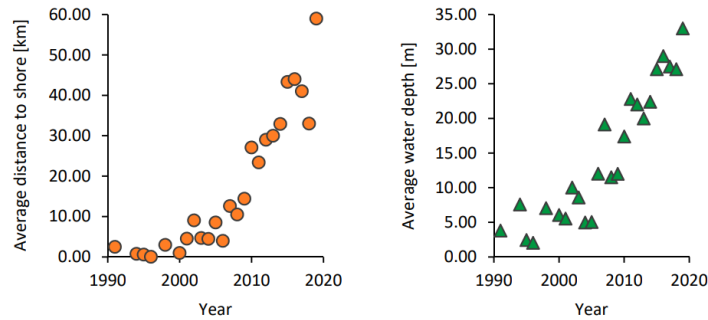


Figura 15. Evolució de la distància a la costa i profunditat en l'eòlica marina [32].

En les últimes dècades les plataformes petrolieres ubicades a profunditats significatives ja s'han plantejat amb una estructura flotant. Dels principals avantatges en el desenvolupament tècnic del sector de l'energia eòlica marina flotant és l'aprofitament de les sinèrgies tecnològiques amb la indústria de l'extracció del petroli i gas natural [23] [37].

Les plataformes flotants garanteixen l'estabilitat mitjançant diferents mètodes que es basen en l'aprofitament de les característiques geomètriques i mecàniques de la subestructura o en l'ús de tecnologies addicionals com amarres tesades. Amb la capacitat tècnica actual és viable emplaçar parcs eòlics flotants en l'ambient marí a ubicacions de 50 a 1000 metres de profunditat [22].

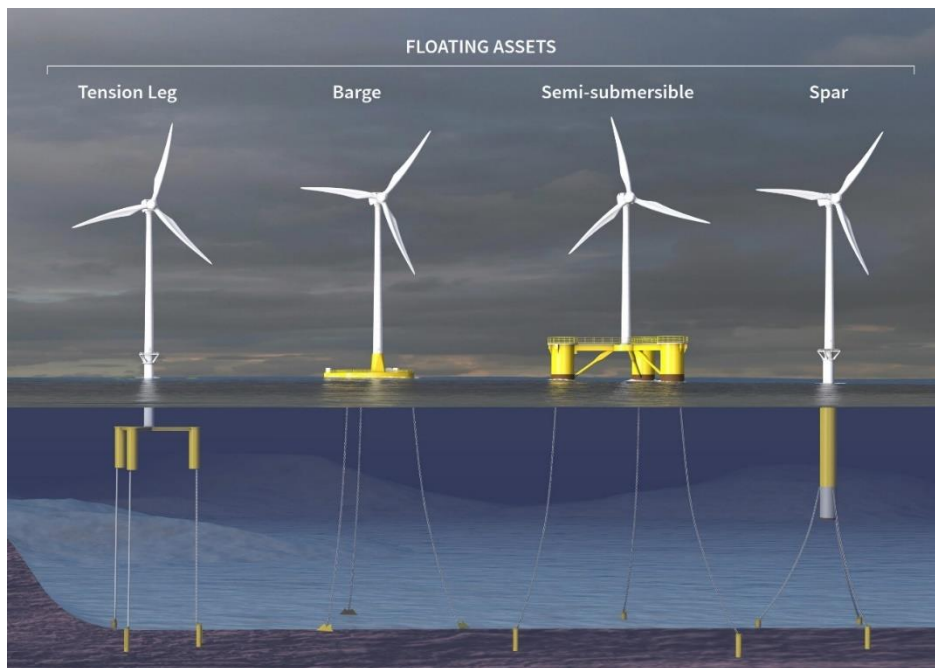


Figura 16. Tipus de plataformes eòliques flotants [38].

El manteniment de la posició de l'estructura s'assoleix mitjançant l'ancoratge al fons marí amb amarres, és a dir, sistemes passius de posicionament com poden ser cadenes, cables d'acer, tendons o cordes sintètiques. Aquestes amarres poden estar tensades o romandre en la posició de catenària quan es troben suspeses sense cap força externa a excepció del seu pes propi. En l'últim cas, gran part de les amarres està en contacte amb el sol marí i, per aquest motiu, hi ha una zona constantment afectada pel moviment de l'estructura.

Els sistemes d'amarres estan ancorats al subsol mitjançant equips de fondeig, és a dir, elements que eviten el moviment de les amarres en l'extrem del fons marí mitjançant diferents mètodes d'interacció estructura-subsol (Figura 17). La selecció del tipus d'ancoratge depèn principalment de les propietats del subsol i dels esforços a resistir. En el cas dels morts el manteniment de la posició s'obté amb el pes propi de l'element; amb els pilons s'aconsegueix gràcies al fregament del fust; les àncores d'arrossegament empen l'encastament al terreny i els pilons de succió restringeixen el moviment mitjançant la pressió negativa degut al bombeig de l'aigua.

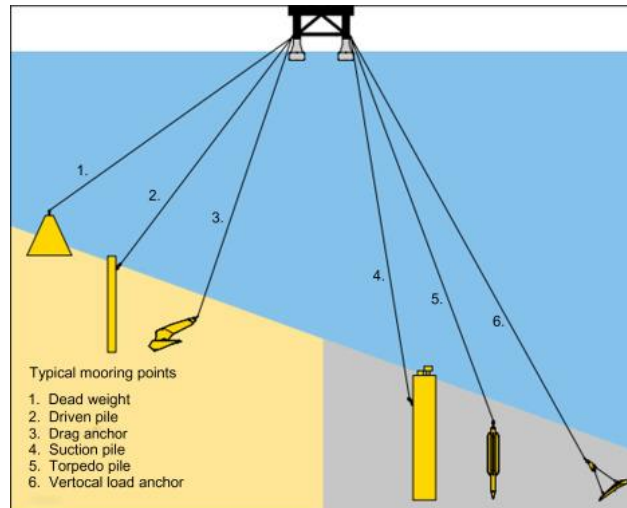


Figura 17. Tipus d'ancoratge [39].

Tot i ubicar els equips d'ancoratge al subsol marí, la dependència de les propietats mecàniques del sol i l'afectació al medi és menor que en el cas d'emprar les massives fonamentacions fixes. Per tant, l'ús de plataformes flotants presenta diversos avantatges tècnics ja que generalment no requereixen ni la preparació del terreny ni la necessitat de protegir l'estructura per fer front a l'erosió o *scouring* dels sediments que envolten les estructures fixes i proporcionen l'estabilitat de la fonamentació. D'aquesta manera disminueixen els costos relatius al manteniment i riscos directes per treballs submarins.

4.2.2.1 GRAUS DE LLIBERTAT

Abans d'introduir els diferents tipus de plataformes eòliques flotants resulta interessant anomenar unes definicions prèvies sobre els comportament dinàmic d'aquestes estructures al medi marí.

Considerant les definicions nàutiques i analitzant les estructures flotants com un sòlid rígid, es poden definir 6 graus de llibertat respecte del centre de gravetat (CDG) de la plataforma: els tres desplaçaments i les tres rotacions respecte els eixos tridimensionals. Aquests moviments estan induïts per les accions externes compostes principalment per les càrregues aerodinàmiques del recurs eòlic i per les càrregues hidrodinàmiques tant de l'onatge com de les corrents marines. Addicionalment els moviments també venen condicionats per les càrregues gravitatòries dels diferents elements que actuen a la plataforma en les diverses etapes de la vida útil de l'estructura (sobretot en els etapes d'operació i manteniment) i les càrregues del sistema d'amarres.

Els moviments provocats per les diferents accions dinàmiques, cícliques i de caràcter no lineal, il·lustrats a la Figura 18, s'anomenen de la següent forma:

Desplaçaments:

- Al llarg de l'eix x: vaivé (*surge*)
- Al llarg de l'eix y: deriva (*sway*)
- Al llarg de l'eix z: puja-i-baixa (*heave*)

Rotacions

- Sobre l'eix x: balanceig (*roll*)
- Sobre l'eix y: capcineig (*pitch*)
- Sobre l'eix z: guinyada (*yaw*)

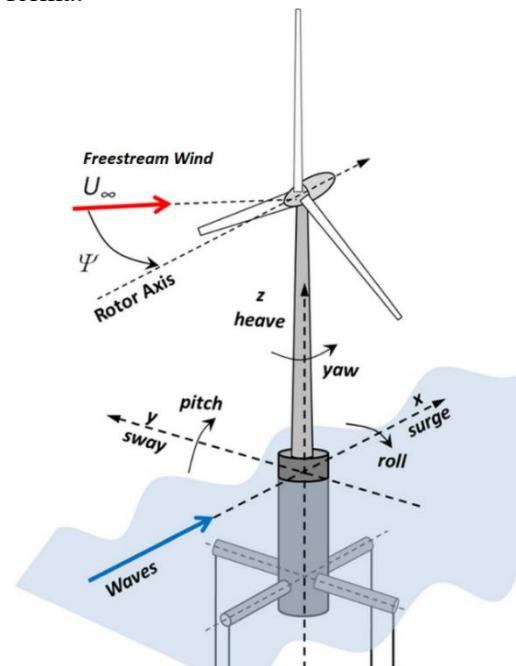


Figura 18. Graus de llibertat d'una plataforma flotant [40].

4.2.2.2 ESTABILITAT HIDROESTÀTICA

L'estabilitat hidroestàtica es produeix quan la resultant de les forces i moments que actuen sobre un cos són nul·les i aquest roman en equilibri estàtic. En els elements flotants és interessant analitzar l'estabilitat del cos quan aquest està sotmès a les accions externes.

En el cas de les plataformes eòliques flotants els moviments més desestabilitzadors són les rotacions sobre els eixos cartesianes, és a dir, el balanceig i el capcineig. Aquests moviments estan induïts pel moment desestabilitzador que produeixen les forces externes respecte el centre de gravetat de la plataforma. Considerant l'estructura com un sòlid rígid, presenta estabilitat a les pertorbacions quan el moment resultant s'oposa al sentit del moviment i així l'element retorna a la posició d'equilibri.

Aquest moment resultant prové de totes les forces actuant a la plataforma, és a dir, el moment del pes propi, de la força de flotació que proporciona del volum d'aigua desplaçat, de les accions externes i d'altres forces com les del sistema d'amarres. Quan la plataforma està sotmesa a les rotacions de balanceig o capcineig, l'únic valor que varia és el centre de flotació, és a dir, el baricentre del volum d'aigua desplaçat i el punt d'aplicació de la força de flotació; mentre que el centre de gravetat de l'estructura només depèn de la geometria de la plataforma. Per aquesta raó, es produeix un parell de forces generat pel pes propi de la plataforma i per la força de flotació. Si aquest moment (en verd a la Figura 19) s'oposa, i en mòdul és major, al moment de les forces externes (en vermell a la Figura 19), el cos retorna a la posició inicial.

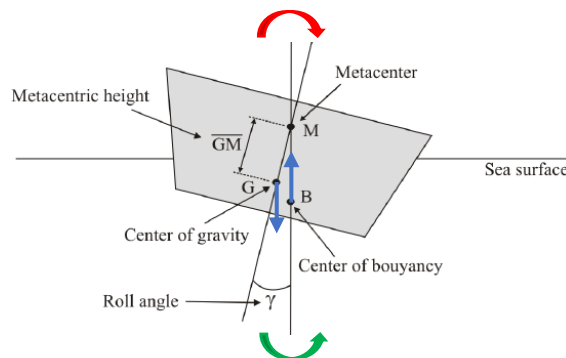


Figura 19. Estabilitat hidrostàtica d'un cos parcialment submergit [41].

El moment estabilitzador produït pel parell de forces es pot definir alhora mitjançant el moment del pes propi i l'altura metacèntrica. El metacentre és el punt d'intersecció entre la línia d'acció de la força de flotació en la situació on s'ha produït una rotació i la direcció de la flotació inicial considerant el gir de l'estructura. L'altura metacèntrica es defineix com la distància entre el centre de gravetat l'element i el metacentre. S'observa que una altura metacèntrica positiva implica un moment estabilitzador major mentre que una altura metacèntrica negativa implica que l'estructura no es troba en equilibri estàtic. Una de les formes per incrementar l'altura metacèntrica és la minoració del centre de gravetat, obtenint un braç de palanca del moment estabilitzador major.

Es demostra d'aquesta manera la dependència de la geometria i de la distribució de la massa a l'estabilitat de la plataforma. D'aquesta forma el disseny de les plataformes limita els girs més restrictius a valors assumibles i dimensiona tant la geometria com la distribució de la massa a fi evitar riscos en l'estabilitat. A més, per monitoritzar i conèixer l'estabilitat de l'estructura a temps real, resulta interessant conèixer els valors del centre de gravetat i centre de flotació quan l'estructura està en operació.

4.2.2.3 TIPUS DE PLATAFORMES EÒLIQUES FLOTANTS

Actualment hi ha diversos tipus de plataformes eòliques flotants i el seu ús depèn de les característiques de l'emplaçament i dels condicionants econòmics i tècnics. La principal diferència entre les tipologies d'estructures recau en la metodologia per garantir la flotabilitat i l'estabilitat hidrostàtica del aerogenerador marí. Per aquest motiu, es distingeixen principalment tres sistemes (Figura 20):

- **L'estabilitat hidrostàtica per llast** consisteix en ubicar una quantitat de llast òptima a la part inferior de la plataforma perquè el centre de gravetat sempre estigui per sota del centre de flotació. Talment, es garanteix que el moment resultant de l'empenta hidrostàtica i del pes propi s'oposi al moment desestabilitzant de les forces externes.
- **L'estabilitat hidrostàtica per pla d'aigua** tracta en augmentar la inèrcia de la superfície de contacte entre la plataforma i el pla d'aigua a fi d'incrementar l'altura metacèntrica. La distribució de la pressió a la superfície i la major empenta hidrostàtica resultant garanteixen l'estabilitat de l'estructura.
- **L'estabilitat hidrostàtica per amarres** es basa en l'ús de tendons estructurals tesats que impedeixen els moviments de l'estructura degut a la gran força vertical d'ancoratge que s'oposen a l'excés de flotació de l'estructura.

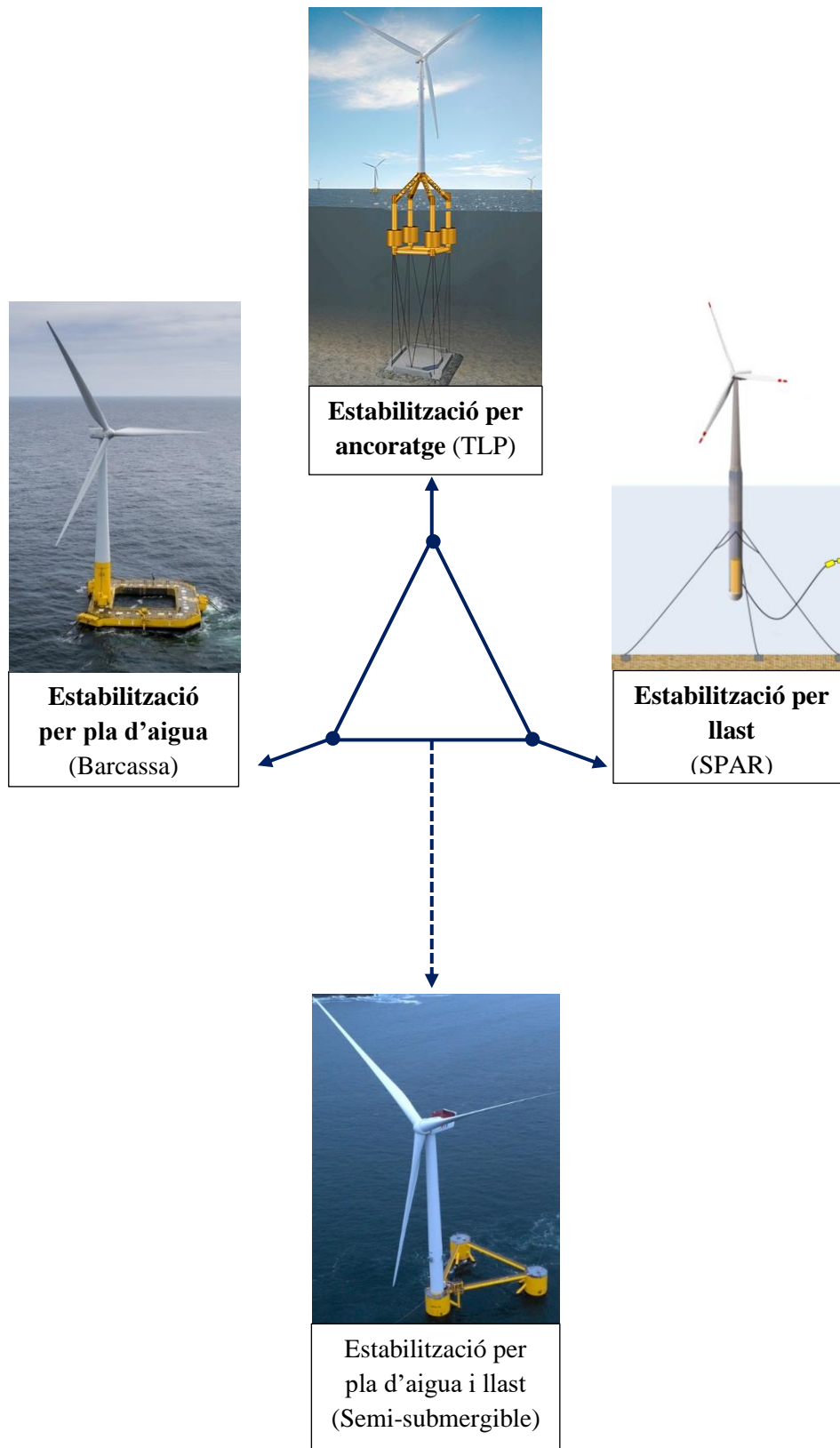


Figura 20. Mètodes per garantir l'estabilitat hidroestàtica (en sentit horari des de dalt: GICON, WindCrete, Windfloat i FloatGen) [42] [16] [43] [44].

A continuació es representen les característiques generals dels principals tipus de plataformes eòliques marines flotants (Taula 1). A l'Annex I hi ha disponibles aquestes característiques dels quatre diferents tipus d'estructura de forma més detallada.

Les propietats descrites a continuació són de gran rellevància ja que condicionen la viabilitat econòmica, tècnica i ambiental dels projectes. Actualment, en aquesta indústria pionera en procés d'expansió, la innovació tecnològica és essencial per tal de millorar aquestes característiques. Els àmbits de desenvolupament tracten des del punt de vista de l'eficiència dels materials, la senzillesa de la geometria per minimitzar el costos de fabricació, la seguretat en el transport, d'instal·lació i d'operació de l'estructura, el disseny del sistema d'amarres eficient, l'optimització del mètode de transport per minorar els impactes econòmics i ambientals, entre altres.

En color verd s'indiquen les característiques que ofereixen més competitivitat econòmica, ja que l'objectiu és minorar el LCOE de l'energia eòlica flotant perquè esdevingui cada vegada més profitosa respecte les alternatives fòssils tradicionals.

	SPAR	Barcassa	Semisub	TLP
Mètode d'estabilització	Llast	Pla d'aigua	Pla d'aigua i llast	Ancoratge
Profunditat mínima	80-100m	30m	40m	50-60m
Estructura	Cilindre buit de gran calat	Estructura senzilla de gran superfície	Cilindres buits connectats en gelosia	Estructura senzilla de dimensions reduïdes
Estabilitat	Bona estabilitat degut al gran calat i al llast	Sensible als moviments de pitch i roll	Estabilitat acceptable per la flotació i llast	Bona estabilitat condicionada per les amarres
Fabricació	Simple	Acceptable	Complexa	Acceptable
Amarres	Catenària (simple)	Catenària (amarres més robustes)	Catenària (simple)	Tendons tesats
Instal·lació de la turbina	Offshore	Onshore	Onshore	Onshore
Transport	Remolc horitzontal o ús de HLV ¹ i grues	Remolc vertical	Remolc vertical	Remolc vertical (necessitat d'un vaixell especial)

Taula 1. Característiques principals de les plataformes eòliques flotants [23] [37] [45].

¹ Heavy Lift Vessels (HLV): vaixell que permet el transport de grans càrregues

4.2.2.4 WINDCRETE

El WindCrete és una subestructura o plataforma eòlica flotant tipus SPAR. La principal diferència amb les altres plataformes SPAR recau en que està construïda amb un disseny monolític de formigó armat i pretensat. Aquest valor afegit implica una sèrie d'avantatges respecte altres solucions convencionals. Les principals són la gran vida útil i el baix cost associat als materials, al procés de construcció, transport, muntatge i manteniment. És una estructura dissenyada per un equip de recerca de l'Escola de Camins a la UPC liderat pel prof. Climent Molins. Actualment ja s'ha construït satisfactòriament un model del WindCrete a escala 1:100 per avaluar el seu comportament en condicions de laboratori.

o Estructura

L'estructura consta de tres parts (Figura 21) les quals estan construïdes de forma contínua sense juntes: el flotador, l'estructura de transició i la torre. Tots els elements que es descriuen a continuació estan constituïts per geometries on el seu interior és buit perquè el balanç entre les forces gravitatòries i l'empenta hidroestàtica de l'aigua impliqui la flotabilitat de l'estructura.

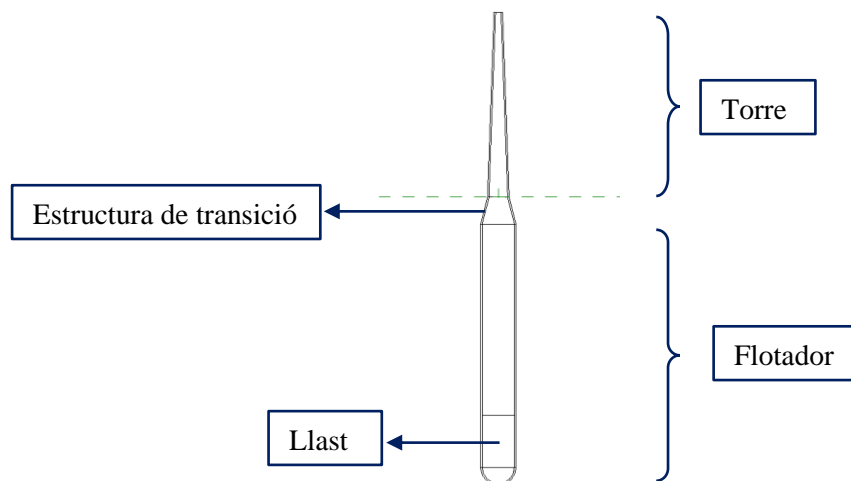


Figura 21. Parts del WindCrete (model 2 MW).

El flotador és l'element estructural que està submergit a l'aigua i aporta la flotabilitat degut a la seva menor densitat respecte de la del gran volum d'aigua que desplaça. Consta d'una geometria cilíndrica de gran calat (o *draft*) amb una semiesfera de base inferior per permetre la continuïtat de l'armadura activa i per optimitzar la distribució de tensions a la base [46]. Tal com s'ha esmentat en apartats anteriors, al tractar-se d'una plataforma esvelta tipus SPAR, es necessita mantenir el centre de gravetat sota del centre de flotabilitat per garantir l'estabilitat de l'estructura. Per aquest motiu, dins del flotador s'hi deposita una quantitat de llast òptima que asseguri tant la flotabilitat com l'estabilitat de l'estructura quan aquesta està sotmesa a accions externes.

L'estructura de transició està formada per una geometria de tronc de con, el qual s'ubica just a sota del nivell de l'aigua. Aquest element ofereix una transició suau entre el flotador i la torre, i és la secció més crítica de la plataforma degut a l'impacte de l'onatge i a la flexocompressió induïda per les accions del vent i pel pes propi de l'estructura que actua al llarg de la torre.

La torre és la part de l'aerogenerador visible, és a dir, el tram situat sobre del nivell del mar. Es tracta també d'una geometria de tipus tronc de con, ja que el diàmetre va disminuint al llarg de l'altura. D'aquesta manera s'obté una estructura eficient en relació als esforços interns que pateix l'estructura i la resposta estructural requerida. De tal manera, la base de la torre -o la cara superior

de l'estructura de transició- té el diàmetre més gran de la torre per oferir un moment resistent superior a la secció més sol·licitada.

L'equip de recerca de WindCrete ha plantejat diversos dissenys per turbines diferents, de 100kW, 2MW, 5MW i 15MW respectivament. Tot i el factor d'escala entre els diferents models, les geometries són força similars i presenten elements constructius anàlegs. Per aquesta raó, resulta atractiu dur a terme un disseny paramètric en el qual es puguin crear diverses geometries i extreure'n les característiques i propietats principals.

○ Característiques

El Windcrete està dissenyat mitjançant una estructura monolítica de formigó pretensat amb armadures actives postesades i armadures passives en forma de barres longitudinals rectes i barres transversals circulars. El material principal és el formigó d'alta resistència mecànica (60-80 MPa) per resistir, entre d'altres, el fenomen crític de fatiga local i unidireccional provocat per les càrregues cícliques en la direcció dominant de l'onatge.

D'una banda, les estructures de formigó han d'emprar més material en comparació amb les estructures d'acer per obtenir la mateixa resposta estructural [46]. No obstant, l'ús del formigó permet disminuir els costos de l'estructura en un 60% degut a la matèria primera més assequible i menys volàtil que l'acer [16] [32]. Alhora, el bon comportament del formigó en l'ambient marí implica disminuir les despeses en manteniment i augmentar la vida útil de l'estructura [47] [48] [49]. A més, el transport i muntatge de la plataforma WindCrete presenten nombrosos avantatges econòmics i tècnics respecte les alternatives convencionals. Així s'aconsegueix un LCOE que oscil·la entre 83 €/MWh i 109 €/MWh, obtenint una gran competitivitat amb les alternatives de fonamentació fixa on els costos de generació d'electricitat fluctuen entre 73 €/MWh i 142 €/MWh.

El disseny monolític del Windcrete permet usar la seva flotabilitat per remolcar la plataforma horitzontalment mitjançant embarcacions de menys dimensions i sense haver de comptar amb barcases de grans capacitats de càrrega (Figura 22) [50]. Una vegada a la ubicació corresponent, s'omple l'interior de la plataforma amb aigua del mar de forma controlada per hissar l'estructura. Aquests processos es duen a terme amb una embarcació tipus catamarà [46]. A continuació s'inunda el 90% de l'estructura per instal·lar la turbina a una altura adequada sense haver d'emprar grues de gran capacitat ni embarcacions especialitzades (Wind Turbine Installation Vessels). Seguidament se substitueix de forma gradual l'aigua de l'interior per llast de major pes específic assegurant la verticalitat, flotabilitat i estabilitat de l'aerogenerador marí. Finalment, quan l'estructura està totalment instal·lada, es procedeix a l'ancoratge al subsol marí amb amarres perquè la plataforma romangui a la localització establerta.

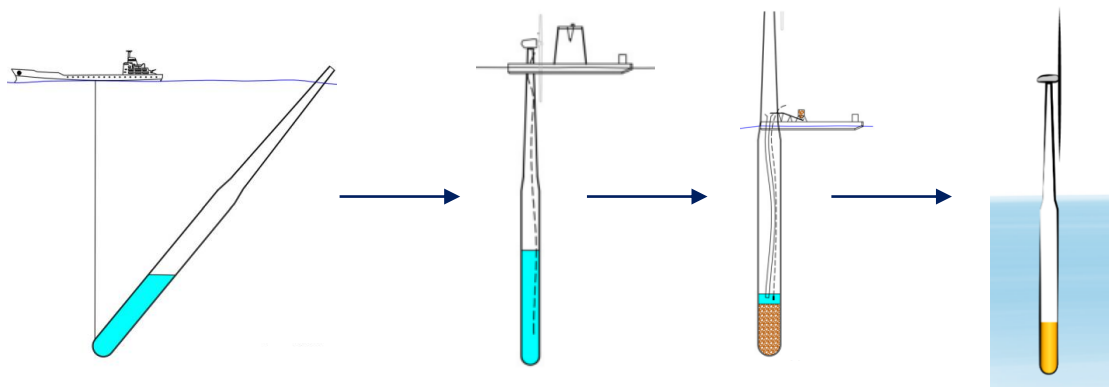


Figura 22. Hissat del WindCrete [46] [50].

Al llarg dels anys s'ha demostrat que el formigó presenta característiques òptimes en l'ambient marí per la bona relació entre el cost, la sostenibilitat i la durabilitat [32] [49] [51], i diversos estudis han constatat el bon comportament del formigó per les plataformes eòliques marines.

D'una banda, en el sentit estructural, les innovacions de l'últim segle respecte del formigó pretensat han permès un comportament òptim d'aquest material en estructures amb gran llums sol·licitades a flexió. Actualment es poden emprar aquestes estructures en àmbits com les torres eòliques, on l'ús de l'acer era exclusiu degut a l'alta resistència mecànica i ductilitat [48].

D'altra banda, l'ambient marí corrosiu i erosiu és un dels aspectes més importants que condiciona el disseny de les plataformes flotants. Els principals fenòmens a considerar són l'atac químic degut a les salts dissoltes a l'aigua marina, l'atac biològic induït per la presència d'organismes marins com les algues, i l'atac físic o l'abradió per l'impacte de l'onatge i les fissuracions provinents dels cicles de gel/desgel [51]. El formigó d'alta resistència mecànica i baixa relació a/c proporciona una baixa porositat amb permeabilitats de l'ordre de 10^{-10} : 10^{-13} , reduint l'entrada dels agents externs a l'estructura [46]. Per controlar la fissuració, el disseny del WindCrete planteja l'ús d'adicions de fum de sílice per minorar la quantitat de clínquer. Addicionalment el pretensat ajuda a minimitzar l'efecte d'agents agressors degut al menor nombre de fissures en el formigó quan aquest és sol·licitat a esforços de tracció.

Mitjançant la resistència addicional a l'ambient marí, actualment les plataformes eòliques offshore de formigó poden arribar a tenir una vida útil de 50-100 anys; mentre s'estima que les solucions tradicionals en acer arriben fins als 20-30 anys. En el cas concret del WindCrete s'estima una durabilitat superior als 60 anys [46]. D'aquesta forma, tant l'impacte ambiental com l'amortització econòmica de la infraestructura es veuen afectats positivament.

Un dels principals objectius de l'energia renovable és reduir les emissions de gasos contaminants. Per complir amb aquest objectiu i que l'impacte ambiental d'aquestes instal·lacions sigui positiu, és de gran importància analitzar la petjada de carboni. L'estudi [47] planteja, en 3 escenaris diferents, que la solució metàl·lica comporta més emissions de diòxid de carboni equivalent (CO_2) en relació a l'alternativa de formigó pretensat:

- **Ús de materials tradicionals:** la solució de formigó presenta la meitat d'emissions de CO_2 que l'estructura metàl·lica.
- **Ús de materials reciclats:** l'alternativa de formigó segueix produint menys emissions i comporta un 40% menys de CO_2 associat respecte l'estructura metàl·lica.
- **Ús d'acer reciclat però formigó tradicional:** és el cas més restrictiu per les plataformes de formigó. Tot i així, aquestes presenten un 30% menys de petjada de carboni.

4.3 BUILDING INFORMATION MODELING

El modelatge d'informació per la construcció (*Building Information Modeling*, BIM) és una metodologia de treball col·laborativa que consisteix en la generació de models digitals tridimensionals d'una infraestructura o construcció amb informació associada [52]. La particularitat d'aquesta metodologia recau en l'última característica esmentada, és a dir, la informació, que permet una millora de la gestió dels projectes en el sector de la construcció. D'aquesta manera, els trets principals del BIM es poden definir com:

- **Modelatge (*Modeling*)**

Tradicionalment els plànols constructius s'han dut a terme mitjançant la representació bidimensional de línies, arcs i textos. La principal diferència amb el BIM és que es permet el modelatge tridimensional mitjançant entitats o objectes que descriuen cada element, com per exemple bigues, pilars, lloses o finestres (Figura 23). Aquests objectes estan parametritzats segons diferents variables geomètriques com l'espessor, el cantell, l'amplada, etc. Això comporta la reducció d'errors a l'hora de dissenyar les estructures, la millora de la productivitat en la modelització i poder efectuar modificacions de forma més eficient.

La component tridimensional ofereix principalment l'avantatge d'una visualització i comprensió del projecte superior, i permet definir les seccions constructives, alçats i plantes del model que es desitgin. A més, la modificació d'un element en qualsevol de les vistes esmentades s'actualitza en la totalitat del projecte.



Figura 23. Modelatge amb línies (CAD, esquerra) i modelatge amb elements (BIM, dreta) [53] [54].

- **Informació (*Information*)**

El principal valor afegit de la metodologia BIM és la informació associada al model, que permet anar més enllà del simple modelatge gràfic. Conseqüentment, la generació dels diferents models digitals geomètrics ofereix la possibilitat d'afegir informació associada relativa als costos, els proveïdors, les propietats mecàniques dels materials, el procediment tant de construcció com de manteniment i el desmantellament entre nombroses característiques més. Totes aquestes propietats permeten, entre d'altres, la generació i actualització eficient d'amidaments i de pressupostos, de l'anàlisi estructural, de la petjada de carboni, de l'impacte mediambiental, de la planificació d'obra, de la detecció de col·lisions i d'errors al llarg del cicle de vida de la infraestructura. A la següent Figura 24 es posen de manifest les diferents anàlisis per efectuar al model BIM.

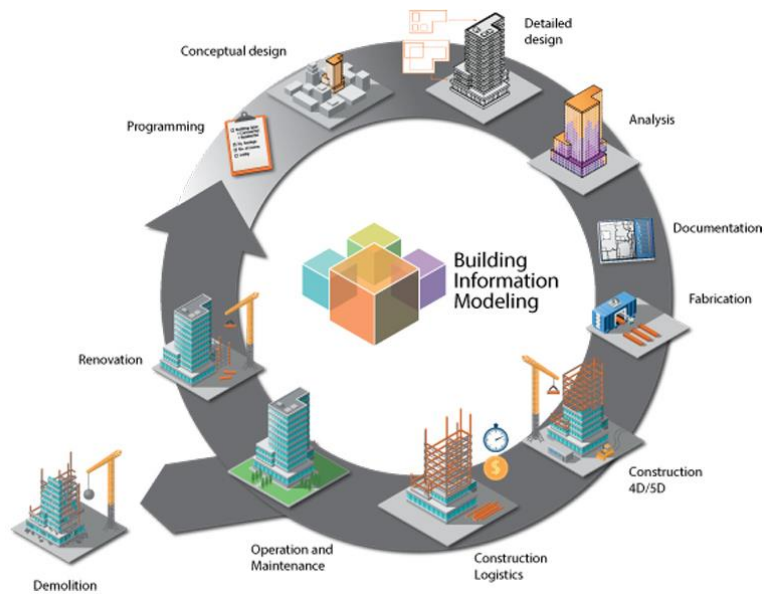


Figura 24. Gestió del model BIM amb les diferents dimensions [55].

D'aquesta forma es defineixen diferents dimensions del BIM en les quals es duen a terme diferents tipus d'anàlisi i representacions mitjançant softwares compatibles [56]. A partir del model tridimensional, les altres anàlisis que es poden dur a terme amb la metodologia BIM s'actualitzen automàticament d'acord amb les variacions del model 3D.

- **Model tridimensional (3D):** modelització digital col·laborativa del projecte on es puguin visualitzar tots els elements que el conformen (estructura, arquitectura i instal·lacions) i poder dur a terme la detecció de col·lisions pertinent. Inclusió de la informació vinculada a cada element per poder executar les següents dimensions.
- **Planificació temporal (4D):** programació detallada de les fases de l'obra amb la informació sobre les activitats a realitzar.
- **Cost (5D):** informació dels amidaments i del cost associat a la construcció del projecte.
- **Sostenibilitat (6D):** anàlisi de la sostenibilitat segons l'estalvi energètic i la gestió de recursos (actualment més rellevant a projectes d'edificació que obra civil).
- **Gestió i operació (7D):** planificació i descripció de les diferents tasques per dur a terme al llarg de la vida útil de la infraestructura per optimitzar les activitats de manteniment i preveure les actuacions a realitzar.

○ **Construcció (Building)**

Les eines del BIM esmentades anteriorment permeten generals models col·laboratius, és a dir, projectes de construcció on els diferents agents de l'obra poden treballar organitzats pel pla d'execució (BEP) i pel coordinador BIM de l'obra. Aquest fet és possible ja que en la metodologia BIM els models es poden exportar al format IFC (Industry Foundation Classes), una extensió de codi obert que permet la interoperabilitat de software. Així, la comunicació i transmissió d'informació es produeix de manera més eficient que en la gestió tradicional dels projectes (Figura 25), reduint els errors, incrementant la seguretat i optimitzant temporalment els processos, és a dir, disminuint els costos. Alhora la interoperabilitat de software permet l'exportació i importació de dades provinents d'altres programaris d'entorn CAD o GIS.

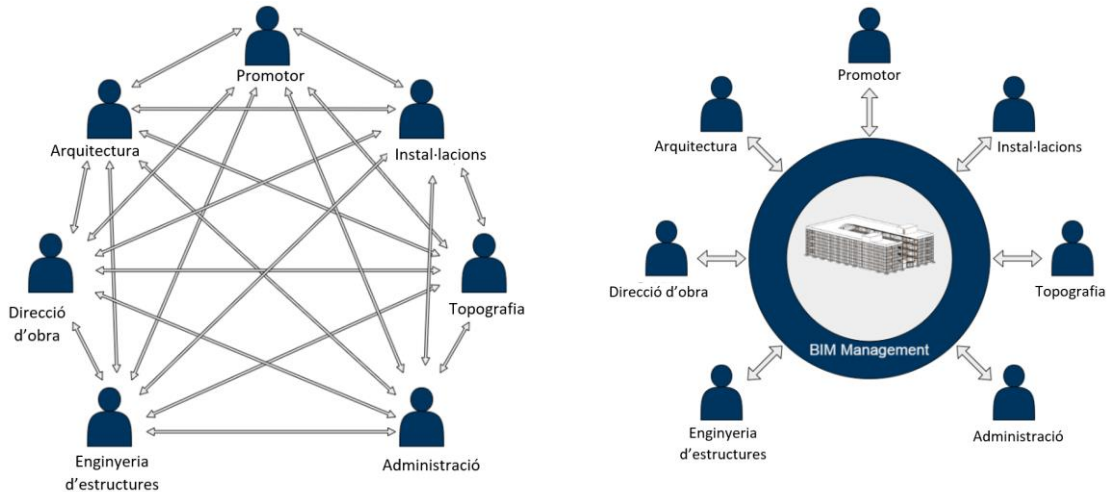


Figura 25. Transmissió d'informació entre els diferents agents en el cas de CAD (esquerra) i BIM (dreta).

Alhora, el sector de la construcció està en un procés per incrementar la digitalització, ja que el desenvolupament tecnològic pot comportar un increment de la productivitat. A l'estudi [57] desenvolupat per McKinsey Global Institute (MGI) i utilitzat per nombroses institucions com l'OECD o la Comissió Europea, es mostra l'índex de digitalització en els diferents àmbits de cada indústria (Figura 26). A diferència de les finances, les empreses de l'àmbit TIC i la indústria de la manufactura, els sectors com l'administració pública, la sanitat, la construcció i l'agricultura són actualment les indústries amb menys grau de digitalització. Aquests últims són sectors tradicionals amb una gran taxa d'ocupació, rellevància al PIB i dependència del sector públic. Concretament, les despeses en les activitats relacionades amb el sector de la construcció representen un 13% del PIB mundial [58].

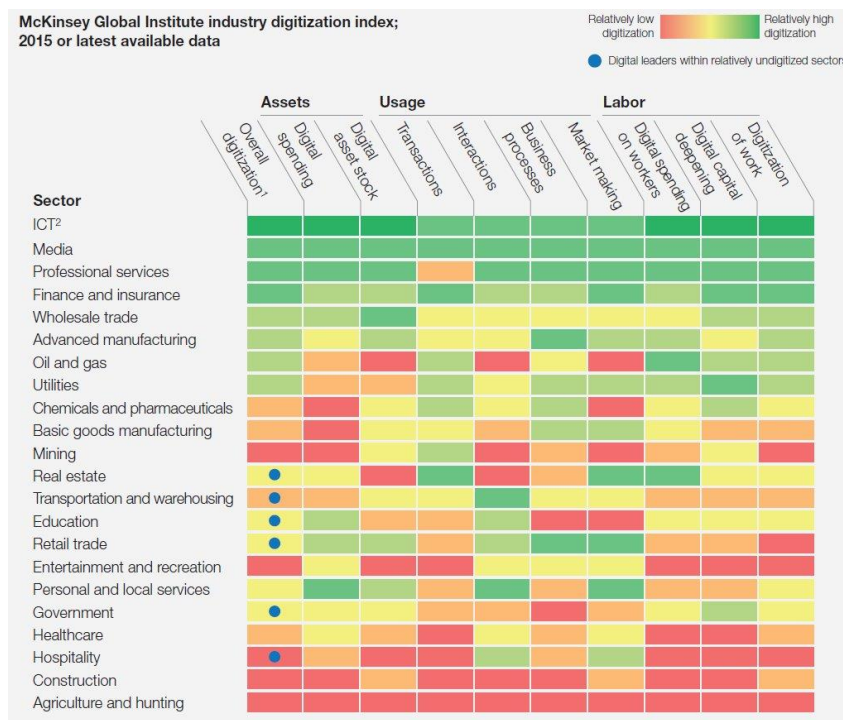


Figura 26. Grau de digitalització en les diferents indústries [57].

En el mateix informe s'exposa l'evolució de la productivitat en diferents sectors de producció. Aquest paràmetre generalment es calcula com la producció de la indústria en dòlars entre el total d'hores treballades pel sector en un cert període de temps. Es posa de manifest que la construcció ha patit un ritme de creixement força menor que el total de l'economia des de principis d'aquest segle. Addicionalment, en l'estudi anual dut a terme per l'agència estadística del Regne Unit o Office for National Statistics [59], es mostra la mateixa tendència de productivitat. En la Figura 27, es mostra que en les últimes dues dècades el sector de la construcció ha incrementat la seva productivitat un 10%, mentre que el total de l'economia i la manufactura han incrementat un 45% i 65% respectivament.

Chart 1: Productivity Growth – Output per worker (1997=100)

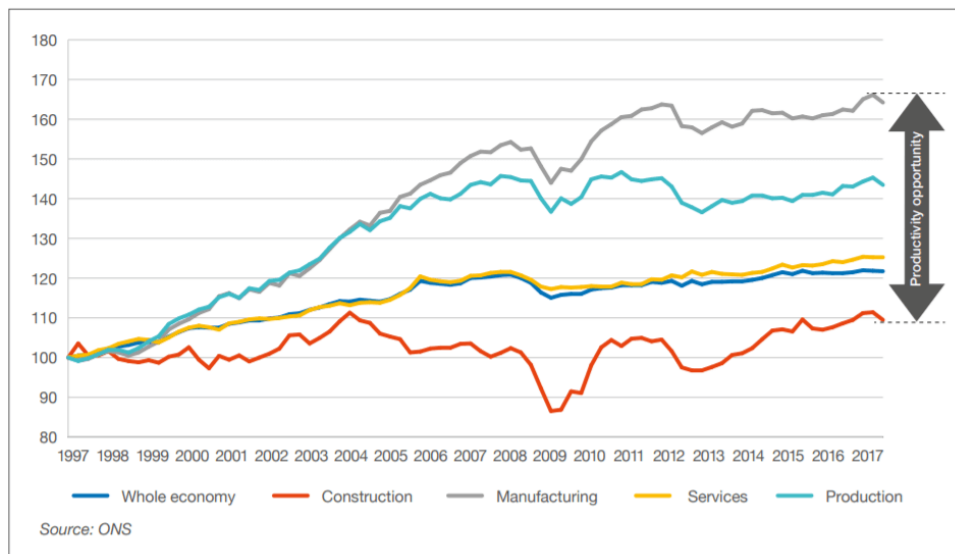


Figura 27. Productivitat en els diferents sectors [59].

La implementació del BIM en l'última dècada ha constatat els nombrosos avantatges descrits anteriorment amb beneficis econòmics notables [60] [61]. Arreu del món el *Return On Investment*, és a dir, el rendiment que es treu d'una inversió, és del 60% en el cas de les empreses que inverteixen esforços en modelar i gestionar els projectes amb aquesta metodologia. En els països capdavaners com el Japó, Alemanya i França, aquesta taxa de benefici supera el 95%. Aquest fet és degut a la reducció d'errors i omissions en el disseny digital dels projectes, a la millora de l'eficiència en la comunicació entre els diferents agents de l'obra i al control dels costos més eficaç. Tots aquests beneficis impliquen una reducció del temps pel disseny i execució dels projectes que milloren alhora la imatge de les empreses.

Actualment nombrosos territoris contempnen l'obligatorietat d'implementar la metodologia BIM per l'adjudicació de projectes a partir d'una certa magnitud econòmica. Aquest és el cas de Catalunya, el Regne Unit, alguns estats d'EEUU, Singapur i els Emirats Àrabs Units [62]. Aquest viratge de les normatives cap al BIM és degut a la gran necessitat per digitalitzar el sector de la construcció per incrementar la seva productivitat. Amb el nivell de maduresa actual del BIM a Europa, s'estima que la implementació d'aquesta metodologia permet estalviar un 13-21% en la fase de construcció i un 10-17% en la fase d'operacions [63].

4.4 DISSENY DE PLATAFORMES EÒLIQUES FLOTANTS

El dimensionament de les plataformes eòliques flotants és un procés complex degut a la gran quantitat de condicionants que s'han de tenir en compte [64]. L'ambient marí comporta haver de considerar tant les accions dinàmiques i cícliques de l'onatge i del vent com l'agressivitat de l'entorn envers les estructures d'acer i de formigó. A més, les estructures flotants estan formades per un gran ventall de components que s'han de dimensionar i s'ha d'analitzar la seva interacció per garantir la seva integritat estructural. Aquests elements consten principalment de la plataforma de suport, les amarres i els ancoratges al subsol marí. Actualment, el procés per dur a terme l'anàlisi de l'estructura flotant i el posterior dimensionament, consta de diferents etapes on s'utilitzen eines digitals per simular del comportament de la plataforma (Figura 28).

El disseny de la plataforma és un dels punts clau en el desenvolupament del projecte per executar un parc eòlic marí. Aquesta fase, s'engloba en l'etapa anomenada Development and Consent (D&C) i els costos associats són aproximadament un 4% dels CAPEX [17] [65]. En aquesta etapa, les principals tasques són els estudis ambientals, l'anàlisi de l'emplaçament en termes d'onatge, vent i subsol i el desenvolupament del projecte. S'estima que aquesta última etapa computa un 70% del cost associat al D&C [65].

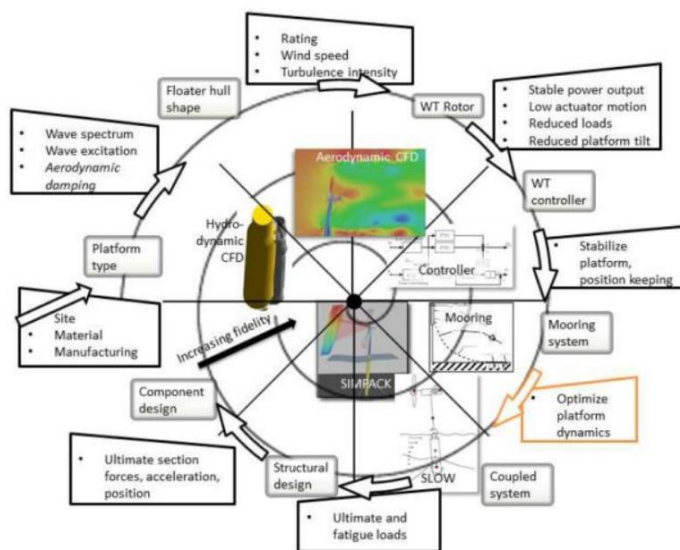


Figura 28. Procés per dimensionar plataformes eòliques flotants [64].

Primer, es duu a terme un predimensionament de les dimensions del flotador segons el tipus de plataforma, els materials, l'estabilitat hidroestàtica i l'anàlisi econòmic. Aquest procés tracta de càlculs bàsics però amb molta càrrega de feina, degut a la gran quantitat de paràmetres i variables a tenir en compte. Actualment, es duu a terme mitjançant fulles de càlcul.

A continuació, es consideren els efectes de les accions del vent i de l'onatge amb un anàlisi hidrodinàmic i aerodinàmic, examinant la interacció de la plataforma amb els elements d'ancoratge. D'aquesta manera, es dimensiona la plataforma flotant i les amarres considerant uns moviments i unes freqüències d'oscil·lació admissibles (Figura 29). Per dur a terme aquesta etapa de disseny més complexa, s'usen eines digitals i algorismes d'anàlisi numèric no lineal com el model enginyeril FAST [66], desenvolupat pel laboratori nacional d'energia renovable dels Estats Units (NREL).

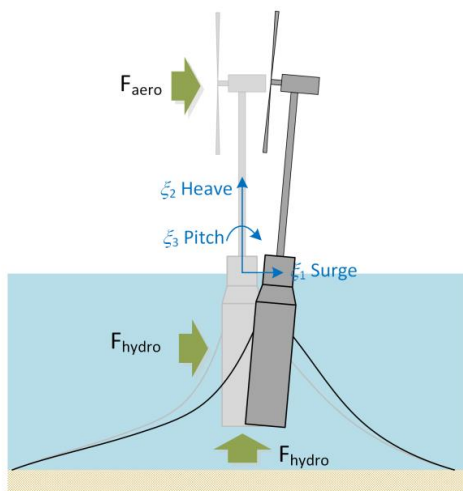


Figura 29. Anàlisi dinàmica d'una plataforma tipus SPAR: forces i moviments [67].

Finalment, es duu a terme l'anàlisi estructural amb les accions actuant i considerant, entre d'altres, el fenomen de fatiga, la corrosió i el període de retorn de l'estructura. Es verifiquen els estats límits últims i els estats límits de servei pertinents a fi d'obtenir les seccions detallades de la plataforma i de les amarres. Per la naturalesa iterativa dels processos de dimensionament, l'estructura dissenyada es torna a verificar segons el comportament hidroestàtic, hidrodinàmic, aerodinàmic i estructural, per optimitzar la solució obtinguda tècnicament i econòmicament.

Actualment, existeixen diversos softwares especialitzats en la simulació de les plataformes eòliques flotants, que permeten l'anàlisi hidrodinàmic i aerodinàmic alhora que el càlcul estructural dels diversos elements que conformen l'estructura (Figura 30). Aquestes eines digitals s'usen principalment per dur a terme una verificació del conjunt de l'estructura considerant tant les accions externes com la interacció entre la torre, la subestructura, el flotador i les amarres.

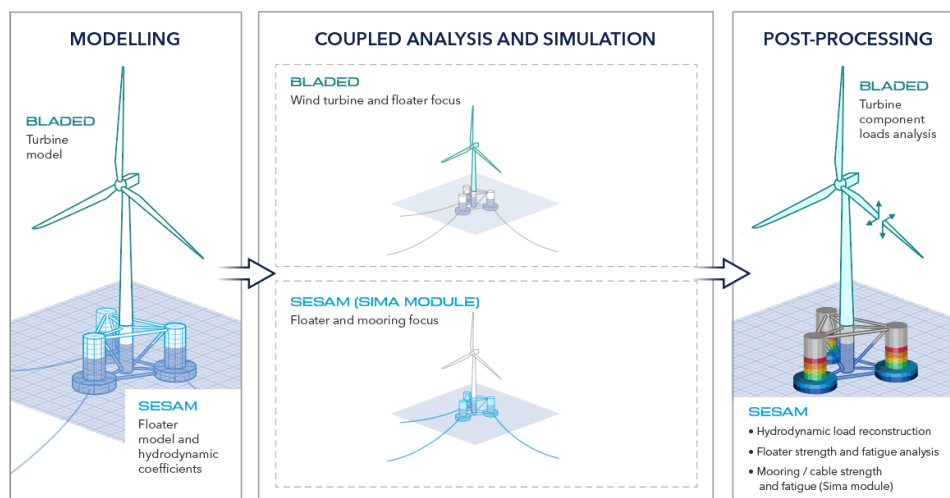


Figura 30. Software per la simulació digital de plataformes eòliques flotants [68].

Els aerogeneradors marins flotants consten d'infraestructures d'una magnitud notòria que requereixen d'una inversió inicial i de manteniment significativa. A més, es tracta d'un camp pioner on actualment s'està en procés de desenvolupament tecnològic i implementació a petita-mitjana escala. Per aquests motius, posteriorment al dimensionament de l'estructura i prèviament a la construcció comercial del parc eòlic offshore, es fabrica un model reduït a escala on s'experimenta i es verifica el seu comportament en un canal artificial o *flume*. Si les condicions

ho requereixen, encara es duu a terme un pas intermedi addicional i es construeix un prototip a escala real, on, a part de la resposta estructural de la plataforma, s'analitza la viabilitat del procés constructiu. En conseqüència, s'examinen els punts conflictius en la cadena de subministrament, en les tasques de construcció i en el transport de l'aerogenerador a l'emplaçament marí.

D'aquesta forma, en el procés típic per dimensionar una plataforma eòlica flotant no s'empren les eines de la metodologia BIM. No obstant, diversos estudis [67] [69] [70] [71] [72] plantegen el gran ventall d'avantatges i reptes que comportaria usar aquesta metodologia consolidada en el sector de l'obra civil i de l'edificació a l'àmbit de l'energia eòlica marina. El conjunt d'avantatges respon principalment a l'optimització dels processos i la reducció d'errors per minorar el LCOE, i incrementar la competitivitat d'aquesta alternativa renovable. No obstant, els estudis també asseguren que actualment no es pot determinar la magnitud dels potencials avantatges econòmics que suposaria la implementació del BIM, ja que encara no s'ha estudiat la posada en pràctica d'aquesta metodologia en un cas d'estudi real.

Les plataformes eòliques flotants són estructures complexes de grans dimensions amb una quantitat significativa d'elements estructurals. Per aquesta raó, seria eficient comptar amb un model BIM actualitzable on tots els agents de l'obra tinguin accés per consultar informació o per treballar amb el model de forma coordinada amb el Coordinador BIM del projecte. Es podria incrementar l'eficiència en la gestió de la construcció amb l'associació de cada element estructural al proveïdor corresponent. Alhora, els plànols tridimensionals ofereixen una visualització complementària a les seccions constructives bidimensionals i milloren la interpretació dels projectes per disminuir les confusions i els errors. La informació associada i l'elaboració de models quan l'estructura ja està construïda, els anomenats models *As-Built*, permeten incrementar l'eficiència en les tasques de manteniment, operació i l'anàlisi del cicle de vida fins a la demolició. Els treballs de manteniment, i els OPEX associats, són molt significatius en les estructures offshore, de l'ordre del 25% dels costos totals al llarg del cicle de vida de l'infraestructura [65], permetent una disminució del cost de l'energia al llarg de la vida útil de les plataformes.

D'altra banda, a part de la gestió i representació intrínseca del projecte, la digitalització mitjançant les eines BIM permet l'extracció d'informació respecte geometria, amidaments, cost, planificació temporal, simulació del procés de construcció, entre d'altres. A més, les eines com el *clash detection* faciliten la detecció d'errors i d'interseccions de forma ràpida i eficient. De tal manera, es duen a terme les modificacions i correccions pertinents al model tridimensional que automàticament faran variar les seccions constructives i la informació associada. No obstant, la complexitat de l'anàlisi estructural en les estructures offshore, és dels reptes més destacables en aquesta implementació, ja que les eines BIM actuals no contempnen molts fenòmens essencial com l'anàlisi de la fatiga, l'anàlisi no lineal o les turbulències de l'onatge.

D'aquesta forma, la metodologia BIM és una eina potencial per optimitzar exclusivament l'etapa del predimensionament estructural de la plataforma i l'etapa d'operació.

Finalment, en l'actualitat, s'està començant a desenvolupar la digitalització de les infraestructures en les etapes d'operació mitjançant el monitoratge a temps real. La gestió i interpretació de les dades extretes mitjançant sensors es duen a terme amb un *Digital Twin*. Aquests bessons digitals són models que representen el comportament a temps real d'una infraestructura segons les accions externes de l'emplaçament, interpretades amb diversos tipus de sensors. D'aquesta manera, es detecten, entre d'altres, vibracions, emissions acústiques, deformacions, *scouring* o erosió del subsol marí, condicions de l'onatge i moviments de la plataforma [70]. En la Figura 31 s'il·lustren

diferents sensors instal·lats en aerogeneradors marins. Així, la representació d'aquestes dades es produeix en l'entorn col·laboratiu BIM per gestionar l'operació de la infraestructura.

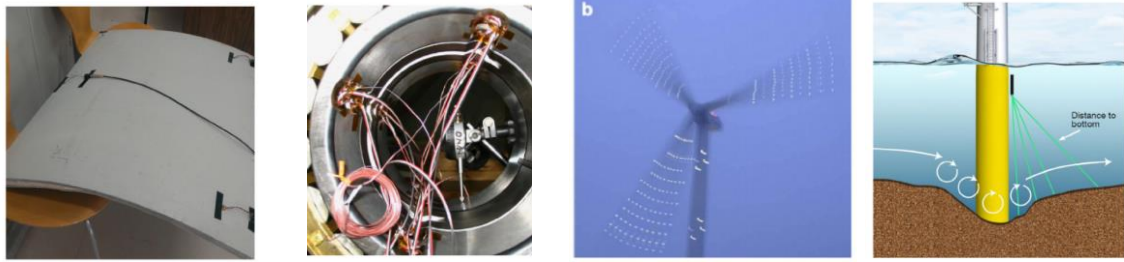


Figura 31. Diferents sensors instal·lats a l'aerogenerador marí per dur a terme el monitoratge [70].

5. CAS D'ESTUDI: MODEL PARAMÈTRIC BIM DEL WINDCRETE

El principal objectiu establert al plantejament d'aquest treball ha estat crear un model BIM parametritzat de l'estructura flotant WindCrete, és a dir, mitjançant uns paràmetres d'entrada poder obtenir la geometria i la informació associada al model com a paràmetres de sortida. D'aquesta manera, s'ha dut a terme un estudi de les característiques geomètriques de la plataforma amb la finalitat poder parametritzar-la. Alhora, s'ha estudiat les diferents possibilitats que ofereix l'eina adoptada de l'entorn BIM (Autodesk Revit) per dur a terme aquesta parametrització. En els següents apartats es mostren les tres diferents metodologies emprades, resumidament tracten en:

1. Primerament, utilitzar les eines del propi programari esmentat per definir la geometria de la plataforma WindCrete de forma paramètrica. Aquesta metodologia comporta la creació de diverses famílies Revit dels diferents elements estructurals que s'ajunten finalment en una única família. Mitjançant plans de referència entre elements i la definició de paràmetres entre aquestes cotes es caracteritza la geometria de l'estructura completa.
2. Una vegada s'ha pogut crear la geometria dels diferents models WindCrete establint uns valors d'entrada (o *inputs*), s'ha volgut extreure informació associada a la geometria creada com a valors de sortida (o *outputs*). Aquesta informació tracta dels paràmetres hidroestàtics com el centre de gravetat, centre de flotació i l'empenta, i és essencial en el predimensionament de les estructures offshore flotants. Aquests valors de sortida depenen principalment de la geometria i materials, i no es poden extreure directament mitjançant les eines del programari utilitzat. Per aquesta raó, s'ha emprat l'eina complementària Dynamo. D'aquesta forma, mitjançant un script de programació gràfica, s'ha extret la informació associada dels models corresponent als amidaments i paràmetres hidroestàtics.
3. Finalment, per parametritzar l'estructura en la seva totalitat, s'ha plantejat el disseny de les armadures passives i actives. Les eines que ofereix el programari d'Autodesk permeten únicament el modelatge de l'armat passiu sense la possibilitat d'establir paràmetres de disseny. D'aquesta forma, s'ha optat per dur a terme el modelatge de l'estructura monolítica amb l'armat mitjançant un script de Python compilat en el programa Dynamo i visualitzat al Revit. Per consegüent, es defineixen les característiques de l'estructura i de l'armat i s'obté una modelització tridimensional al Revit amb la informació associada mencionada anteriorment. Això permet la generació de diferents models WindCrete i extreure eficientment la informació relativa a amidaments, cost i propietats hidroestàtiques; i poder dur a terme una anàlisi d'alternatives respecte la geometria o els materials.

5.1 CARACTERÍSTIQUES GEOMÈTRIQUES

La plataforma eòlica flotant WindCrete per modelitzar paramètricament tracta d'una estructura monolítica de formigó armat i pretensat. Tal com s'ha introduït en els apartats previs, aquesta estructura es pot discretitzar en diferents subelements per tal de dur a terme el disseny digital del model. Aquestes parts consten del flotador submergit, d'una estructura de transició i de la torre on s'ubica la turbina.

Tots aquests elements estan buits al seu interior per aportar flotabilitat a la plataforma. Això implica que l'estructura de formigó està composta per geometries d'un espessor determinat on a l'interior del gruix d'aquesta paret s'hi ubica l'armat d'acer. Addicionalment, com s'observa a la següent Figura 32, s'hi ubica una quantitat de llast a la part inferior de l'estructura per garantir-ne l'estabilitat hidroestàtica.

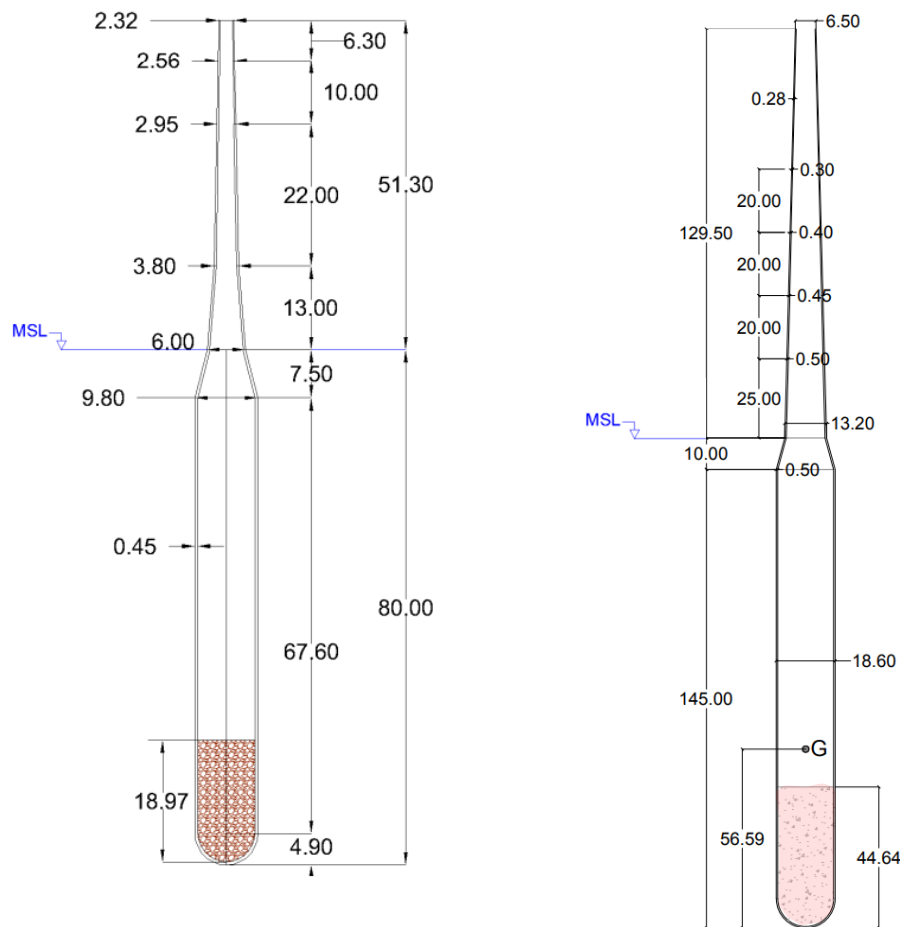


Figura 32. Geometria dels WindCrete 2 MW (esquerra) i 15 MW (dreta). Valors numèrics en metres.

La geometria del WindCrete és variable al llarg de l'altura de l'element, on cada tram de la torre i de l'estructura de transició està compost per una geometria de revolució tipus tronc de con buit amb diàmetres, espessors i altures particulars. A més, es visualitza que l'estructura no presenta continuïtat dels diàmetres al llarg de l'altura de l'element. Per aquesta raó, tot i tractar-se d'una estructura monolítica, és imprescindible dur a terme una subdivisió de cada tram de tronc de con per dur a terme el modelatge paramètric de la plataforma.

Consegüentment, els elements a modelar seran els següents:

- **Flotador:** cilindre buit situat sota de l'estructura de transició i semiesfera buida situada a la part inferior del cilindre.
- **Estructura de transició:** tronc de con buit situat just sota del nivell mig del mar (o MSL), amb el mateix espessor i diàmetre inferior que els elements del flotador.
- **Torre:** estructura formada per diferents troncs de con buits amb espessors i altures diferents però amb continuïtat de diàmetres exteriors entre els elements confrontants, és a dir, el diàmetre inferior de l'element de sobre és el mateix que el diàmetre superior de l'element de sota.
- **Llast:** sòlid de revolució que es situa dins del flotador fins a una certa alçada. D'aquesta forma, la seva geometria consta d'una semiesfera i un cilindre sòlids que tenen el mateix diàmetre exterior que el diàmetre interior del flotador.

5.2 MODELITZACIÓ PARAMÈTRICA AMB REVIT

En aquest apartat s'ha dut a terme un model paramètric del WindCrete usant exclusivament el programari Autodesk Revit. Aquest programari permet el modelatge de projectes de construcció mitjançant, entre d'altres, elements estructurals com pilars, lloses, bigues, perfils metàl·lics o murs i elements arquitectònics com escales, cobertes, portes o finestres.

Els arxius Revit poden ser de projecte (amb extensió .rvt) o de família (amb extensió .rfa). Les principals característiques que diferencien aquests arxius es descriuen seguidament:

- Els **projectes (.rvt)** tracten del modelatge d'una construcció en concret, formada per un conjunt d'elements estructurals, arquitectònics, topogràfics, instal·lacions i conduccions de serveis. El model del projecte conté la informació sobre la gestió temporal del projecte i dels diferents elements que el conformen, permetent dur a terme l'anàlisi estructural i situar la ubicació de l'edificació o la infraestructura en unes coordenades concretes per obtenir diferents dades sobre l'emplaçament. Addicionalment, els projectes permeten exportar els models amb extensió Industry Foundation Classes o IFC. Aquest arxiu facilita la interoperabilitat de software i els diferents agents de l'obra poden contribuir (en els àmbits d'arquitectura, d'estructures i d'instal·lacions) al model compartit.
- Les **famílies (.rfa)** són un conjunt d'elements amb unes propietats geomètriques comunes que es poden afegir als projectes com a components o com a entitats Revit. Aquests elements tenen una representació gràfica particular descrita amb un conjunt de paràmetres. No obstant, variant els valors dels paràmetres s'obtenen diferents tipus de la mateixa família. Dins d'una família també es poden afegir altres famílies i el programari permet *anidar* paràmetres, és a dir, associar els paràmetres entre diferents famílies.

5.2.1 CREACIÓ DE FAMÍLIES

L'aplicació estudiada en aquest projecte planteja la creació d'una família WindCrete formada pels diferents elements de flotador, estructura de transició i torre descrits anteriorment. Cadascun d'aquests elements conté uns paràmetres que, al variar-los, es poden generar diferents tipus d'aquesta família: WindCrete 2 MW, WindCrete 15 MW, WindCrete amb acer estructural i WindCrete amb formigó, entre d'altres. Finalment, cada tipus d'aquestes famílies es pot inserir a un arxiu de projecte tantes vegades com sigui convenient per modelar un parc eòlic en particular.

Per modelar famílies, es poden utilitzar exclusivament cinc eines diferents (Figura 33):

- **Extrusió** (extrusion): creació d'un sòlid a partir d'una secció transversal bidimensional i una profunditat o altura. D'aquesta forma els elements creats són prismes o cilindres.
- **Fusió** (blend): generació de la geometria sòlida definint tant les seccions transversals inicial i final, com la profunditat o altura de l'element. Així, es fusionen ambdós perfils definits creant un element prismàtic.
- **Revolució** (revolve): obtenció del sòlid mitjançant la rotació d'un perfil bidimensional generatriu contingut en un pla al voltant d'un eix de rotació definit.
- **Escombrada** (sweep): formació de la geometria sòlida que consta d'una secció bidimensional al llarg d'un camí determinat.
- **Fusió d'escombrada** (swept blend): creació del sòlid definint ambdós perfils inicial i final i el camí que ha de seguir la forma.

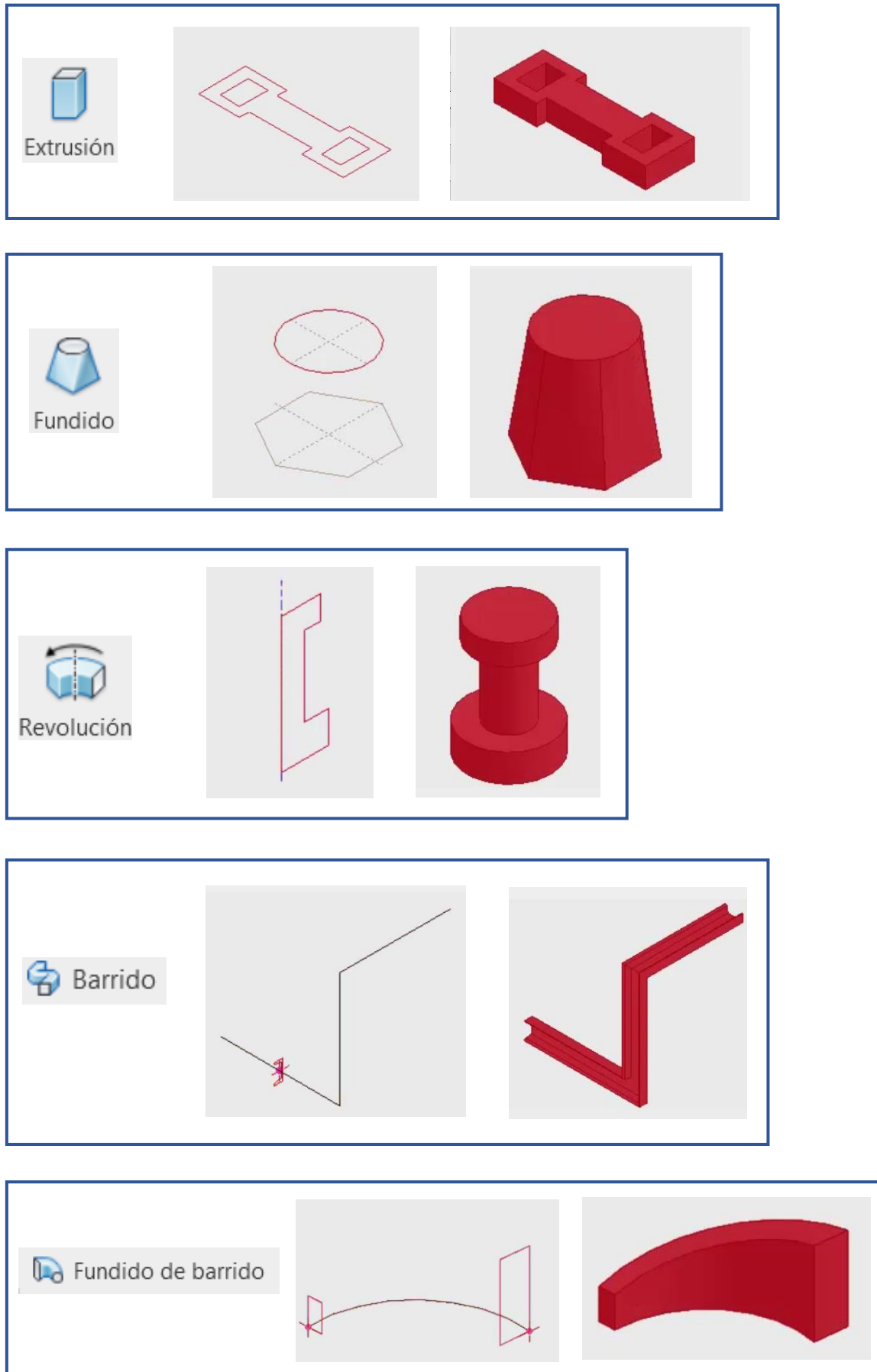


Figura 33. Eines per crear famílies amb Autodesk Revit.

A més, aquestes cinc eines esmentades i il·lustrades anteriorment, es poden emprar per generar formes buides. Aquestes, es poden interseca amb geometries sòlides per modelar elements amb cavitats o amb geometries particulars.

5.2.2 PARAMETRITZACIÓ

Per crear una família paramètrica en el software Autodesk Revit, primerament s’ha de crear un nou arxiu de família (.rfa). Aquest arxiu, ha d’emprar una plantilla de família (.rft) la qual hi té assignada una geometria i uns paràmetres particulars. Aquestes plantilles poden tractar de famílies de bigues i tornapunts, fonamentacions, armadures estructurals, pilars o elements de mobiliari, entre d’altres. Addicionalment, hi ha una plantilla anomenada “Model genèric mètric” per modelar elements genèrics sense cap paràmetre ni geometria assignada a priori.

Una vegada ja s’ha creat l’arxiu de família, es procedeix a crear la geometria mitjançant les eines mencionades prèviament. A continuació, es creen dos plans de referència tenint en compte que el primer serà el pla que romandrà a la posició indicada i el segon serà el que faci desplaçar la geometria d’acord amb el valor del paràmetre establert. Seguidament, s’alineja l’aresta inicial amb el primer pla de referència i l’aresta final amb el segon, bloquejant l’alineació de la cota amb cada pla de referència respectivament per crear la restricció de longitud. Finalment, es crea una anotació en forma de cota alineada, angular, radial, diametral o de longitud d’arc, a la qual s’hi afegirà una etiqueta en forma de paràmetre. Tot aquest procés s’exposa a la següent Figura 34.

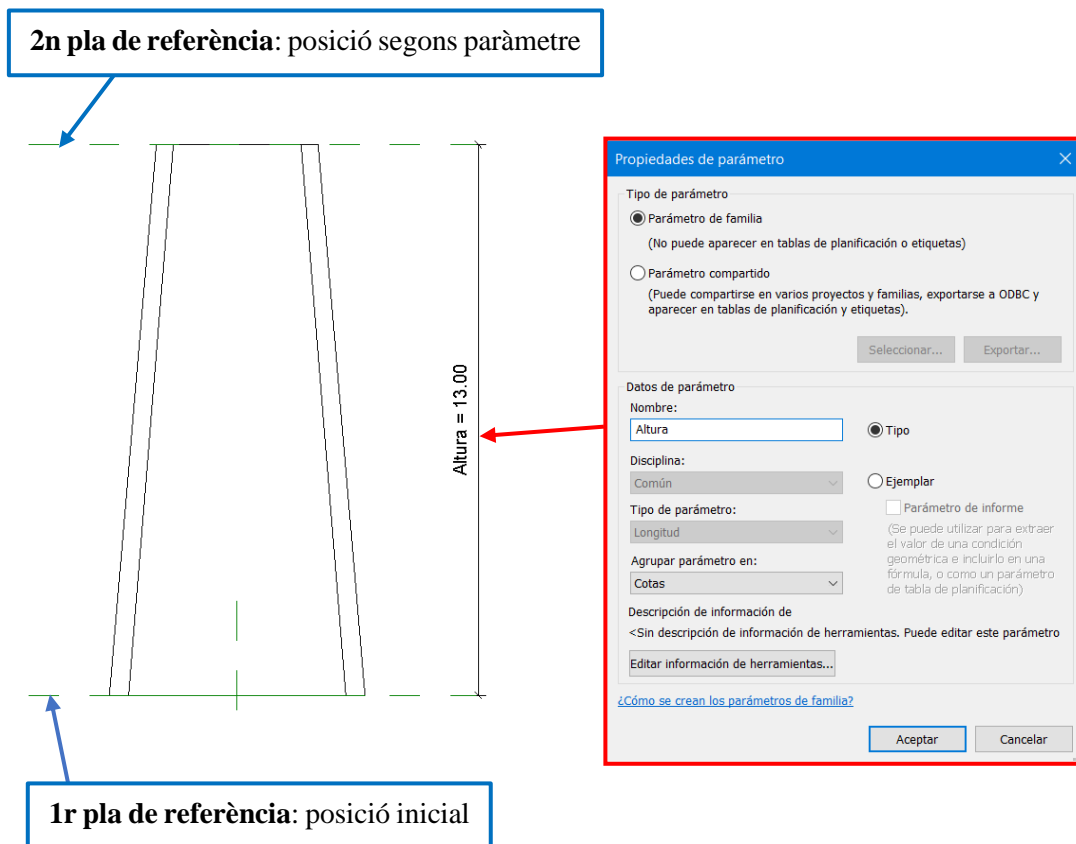


Figura 34. Procediment per parametritzar una figura amb Autodesk Revit.

Els paràmetres poden ser de família, és a dir, una informació exclusiva de la família en particular; o poden ser paràmetres compartits, per poder replicar la parametrització a famílies similars. A més, es diferencien els paràmetres de tipus, on cada tipus de família té un valor particular del paràmetre; i els paràmetres d'exemplar, on un mateix tipus de família pot tenir diferents valors del paràmetre. Per exemple, una família de biga de formigó amb secció rectangular pot tenir diferents tipus de família amb valors del cantell i de l'amplada diferents. No obstant, la longitud de la biga es pot modelar com un paràmetre d'exemplar i cada element del mateix tipus pot tenir un valor de la longitud diferent però les mateixes dimensions de cantell i amplada.

Quan la família ja està creada amb la geometria i parametrització desitjada, es poden crear diferents tipus de família amb valors dels paràmetres determinats (Figura 35). Això es pot dur a terme en l'arxiu de família per poder inserir tots els diferents tipus en qualsevol projecte, o es pot realitzar en l'arxiu de projecte, duplicant el tipus i canviant-li el nom per crear un nou tipus exclusivament pel projecte en qüestió.

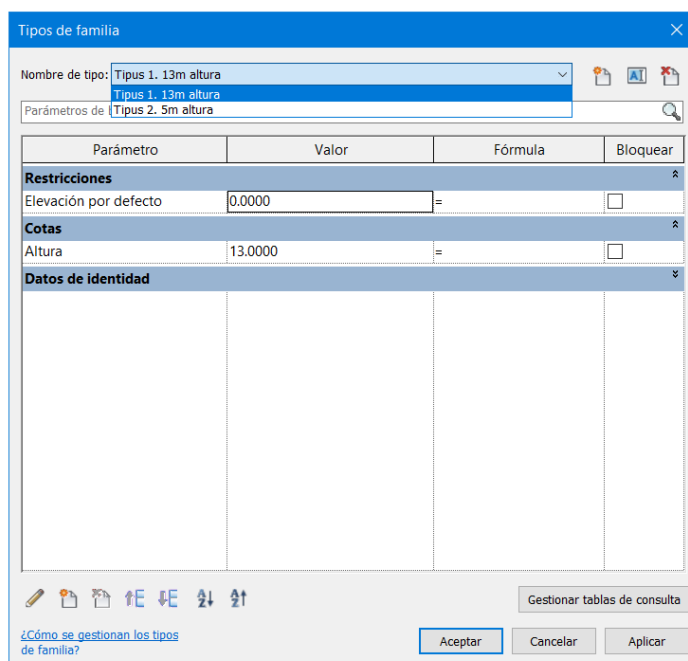


Figura 35. Exemple de diferents tipus de família dins d'una família Revit (Tipus 1, 13m i Tipus 2,5m).

5.2.3 FAMÍLIA PARAMÈTRICA WINDCRETE

La plantilla de família que s'empra per la creació de la família és el "Model genèric mètric", pel fet que la geometria del WindCrete no presenta cap similitud amb els elements de família estructurals o arquitectònics típicament usats en el programari Revit. No obstant, es defineix la categoria de família com a pilar estructural de formigó per poder incloure armadura estructural dins de les parets exteriors de la plataforma.

A continuació, es modelen les quatre geometries, tres de les quals estan buides al seu interior: un cilindre, un tronc de con, una semiesfera i el llast, respectivament. La geometria que a priori sembla més complexa, el tronc de con, és la que es modelarà primer mitjançant les eines prèviament introduïdes.

Preliminarment, es descarta la creació de la família mitjançant l'extrusió i l'escombrada ja que, per definició, el tronc de con no presenta una secció en planta uniforme. Així, es planteja la creació de la geometria paramètrica mitjançant les altres eines que permeten obtenir figures amb dues cares diferents:

○ **Fusió**

Primer, en una vista de planta, es defineixen ambdues cares circulars de l'element -inferior i superior- i es determina la seva profunditat, és a dir, l'altura. Tots aquests valors són aleatoris ja que a continuació es definiran els paràmetres i la família paramètrica permetrà la definició de la geometria segons les variables d'entrada.

Al mateix panell per definir el contorn de les bases de la figura, es defineix una cota diametral per cada cara i s'associen les respectives anotacions amb paràmetres de tipus que indiquen els diàmetres superior i inferior del tronc de con. Posteriorment, en una vista d'alçat es creen dos plans de referència per parametritzar l'altura de l'element. Addicionalment, es desplaça el pla de referència inferior per crear un paràmetre de desfasament en el cas que l'element no estigui situat en el nivell de referència.

Una vegada ja es té la geometria sòlida, s'utilitza el mateix procediment per crear la forma buida al seu interior, on els paràmetres associats són els diàmetres interns de l'element i l'altura de la geometria buida. A continuació, es crea un paràmetre addicional de l'espessor de les parets i s'associa el valor dels diàmetres interiors amb una fórmula que relaciona aquests diàmetres amb la relació entre els diàmetres exteriors i l'espessor, i així poder modelar el tronc de con exclusivament inserint els diàmetres exteriors, l'altura i l'espessor.

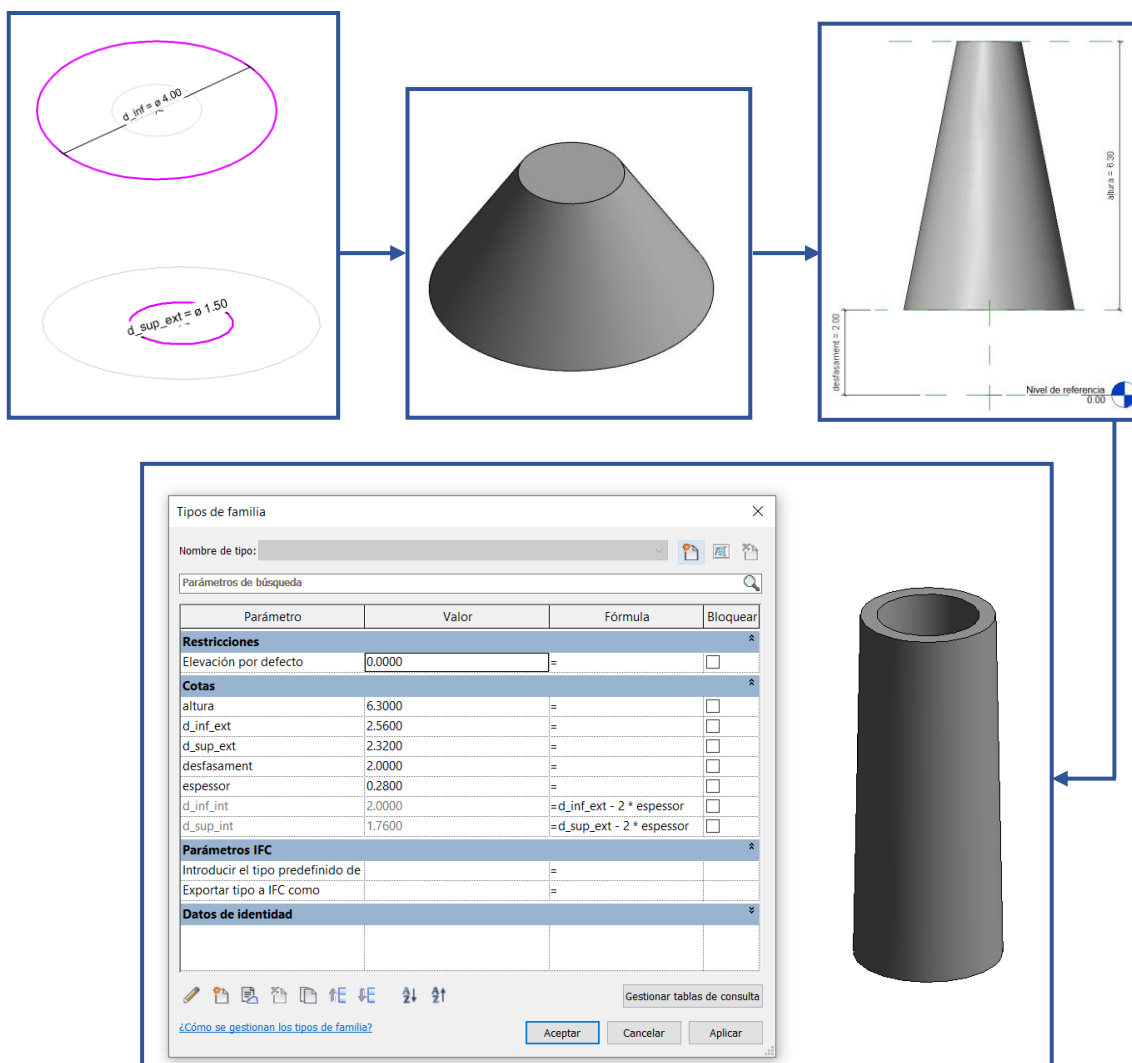


Figura 36. Procediment per parametritzar un tronc de con amb fusió.

○ **Revolució**

En segon lloc, es planteja la generació de la figura paramètrica definint un sòlid de revolució. Per aquest motiu, primerament es genera el perfil bidimensional mitjançant línies de contorn i s'associen diferents plans de referència als vèrtexs del polígon. Aquest últim és el pas essencial i no trivial per acotar els vèrtexs, ja que s'ha de tabular nombroses vegades sobre del vèrtex a fi d'alinear-lo amb el pla de referència respectiu. A continuació es determina l'eix de rotació i es defineixen els paràmetres així com la relació entre aquests.

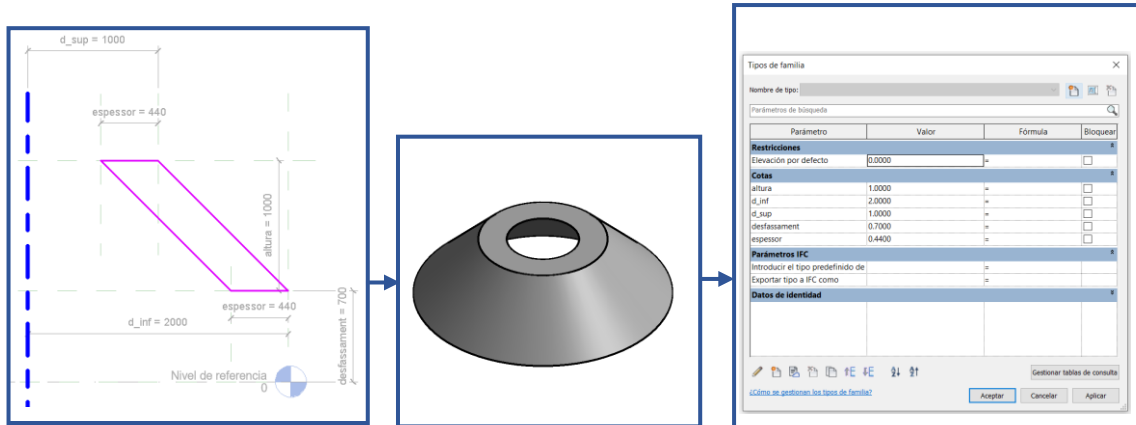


Figura 37. Procediment per parametritzar un tronc de con amb revolució.

○ **Fusió d'escombrada**

Per últim, es duu a terme el modelatge mitjançant l'eina de fusió d'escombrada. Per tant, en una vista d'alçat, es defineix l'esbós del camí per on transcorrerà l'altura de l'element. Després, s'acota i s'estableix el paràmetre que permet determinar l'alçada i es creen els dos perfils de la figura que permeten descriure i parametritzar ambdues cares. Finalment es genera la mateixa figura anàloga però amb una forma buida per obtenir l'element desitjat.

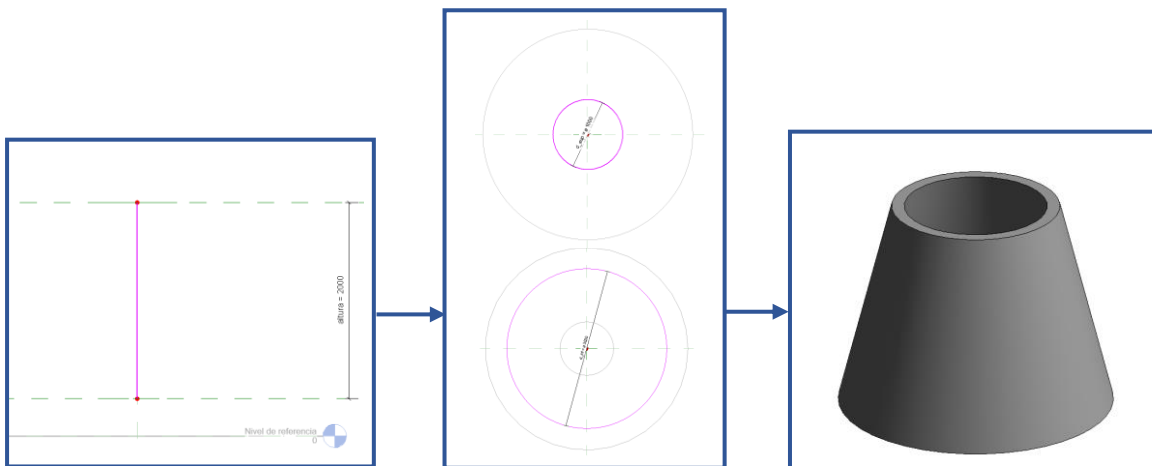


Figura 38. Procediment per parametritzar un tronc de con amb fusió d'escombrada.

Després de modelitzar la geometria “més complexa” de tronc de con emprant les tres eines detallades anteriorment, s’opta per escollir l’eina de la revolució per la senzillesa, ja que exclusivament s’ha de generar una única geometria sense haver de crear una figura buida al seu interior. D’aquesta forma, es creen les figures de cilindre, semiesfera i llast amb el mateix procediment de revolució i acotació amb anotacions lineals i diametral, respectivament.

Una vegada ja es tenen les diferents famílies que componen les tipologies de geometria que es troben al WindCrete, es crea un nou arxiu de família amb la plantilla “Model genèric mètric” i categoria pilar estructural. En aquest nou arxiu s’hi insereixen les respectives famílies i, ja que els diferents WindCrete es poden discretitzar amb quantitats diferents de troncs de con (5 geometries en el de 2 MW i 6 geometries en el de 15 MW), s’insereixen 9 tipus de família tronc de con. A continuació, es creen tants paràmetres -altura, desfasament, diàmetres superior i inferior i espessor- com tipus de famílies que s’insereixin, és a dir, s’han de crear aquests 5 paràmetres 12 vegades. Alhora també es creen els paràmetres per definir els materials del WindCrete: el formigó i el llast. Llavors, es fixen els valors dels paràmetres de la nova família segons corresponguin al WindCrete en qüestió (i es posa una valor 0 a les figures de tronc de con que no es necessitin). Tot aquest procediment no haurà fet canviar res del model, ja que encara no s’han associat els paràmetres del nou arxiu de família als paràmetres de cada tipus de família inserit. Per aquesta raó, es procedeix a associar o *anidar* els paràmetres de cada tipus de família -editant les propietats de cada tipus- als paràmetres del nou arxiu de família tal com es visualitza a la següent Figura 39.

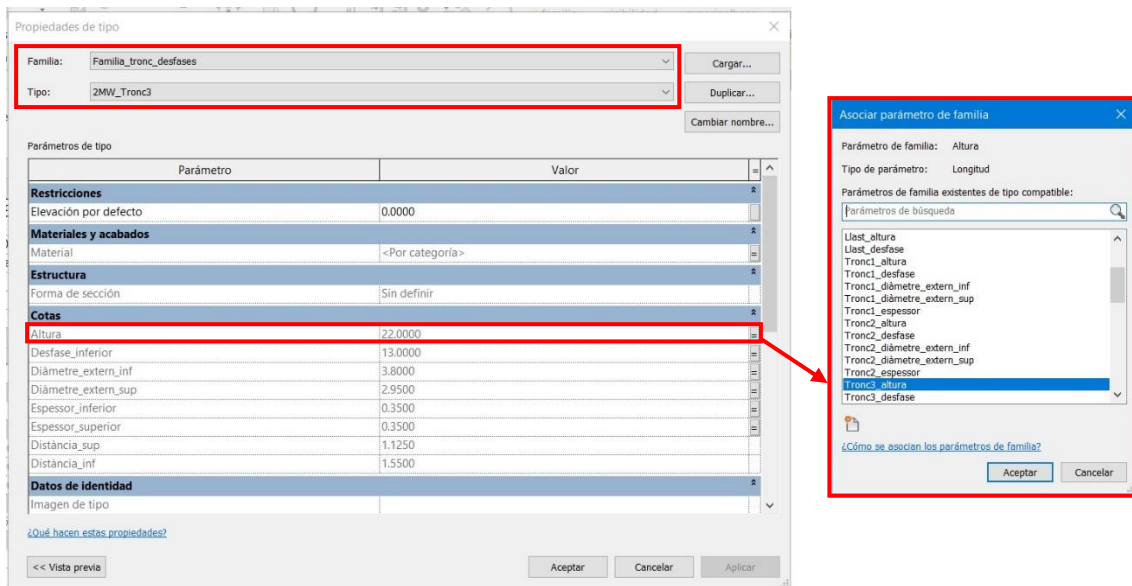


Figura 39. Asociar o anidar paràmetres de diverses famílies.

Quan tots els paràmetres dels respectius tipus de família ja estan anidats als paràmetres de la família global, si escau, s’han de definir les relacions entre els paràmetres. Bàsicament es defineix la continuïtat de diàmetres, és a dir, que el diàmetre exterior superior del tronc de con situat a sota és el diàmetre exterior inferior del tronc de con situat a sobre; o que el desfasament de la figura superior és el desfasament de la figura inferior més la seva altura. D’aquesta forma, finalment, s’obté el model WindCrete paramètric. S’observa a la Figura 40 l’aplicació al WindCrete 2 MW.

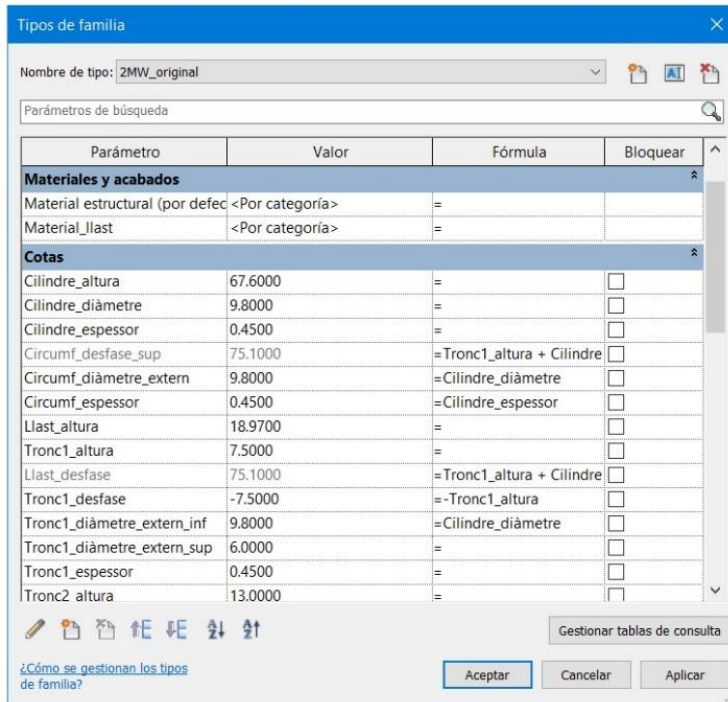


Figura 40. WindCrete 2 MW paramètric.

A continuació, es pot crear un nou tipus d'aquesta família WindCrete per tal d'obtenir un nou model diferent variant els paràmetres. Seguidament es mostra l'aplicació al WindCrete 15 MW.

Nou tipus de família WindCrete

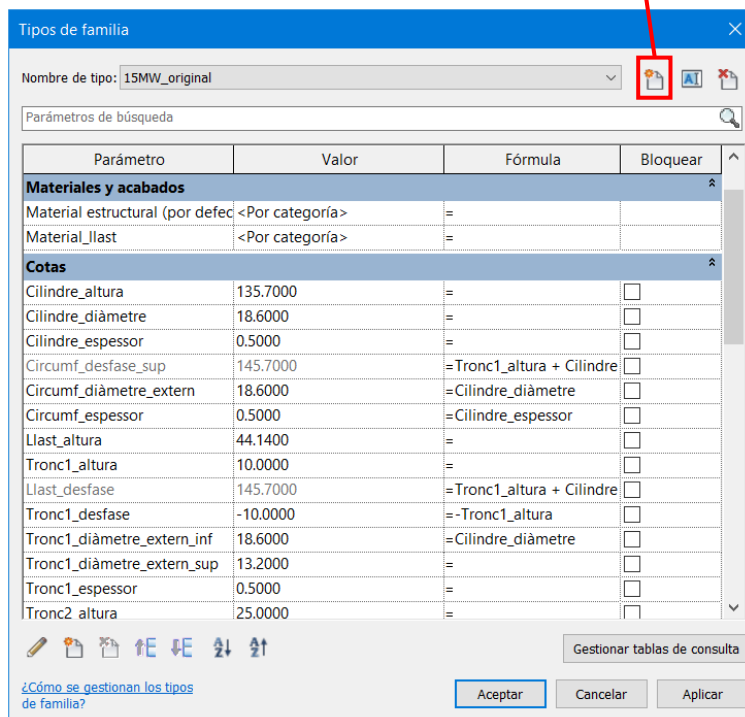


Figura 41. WindCrete 15 MW paramètric.

Aquests models WindCrete es poden inserir a projectes Revit tantes vegades com es requereixi per modelar un parc eòlic en la seva totalitat. En els projectes, també es poden definir els materials que conformen l'estructura. Es poden utilitzar els materials de la biblioteca Revit, es poden crear materials exclusivament pel projecte en concret o es poden crear biblioteques per poder usar aquests materials en qualsevol projecte. Les biblioteques o *Autodesk Revit Material Library Data* tracten d'arxius amb extensió .adsklib on s'hi ubiquen un conjunt de materials que es poden ordenar per diferents categories. En el cas d'estudi objecte d'aquest treball, s'ha creat una biblioteca "Materials WindCrete" on s'ubiquen els diferents tipus d'acer, formigó, llast i les pales de la turbina. Principalment es poden afegir dades d'identitat com el nom, el cost o el fabricant; característiques de la seva representació gràfica; o propietats mecàniques i tèrmiques (Figura 42).

The figure shows two screenshots of the Revit software interface. The left screenshot displays the 'Identidad' (Identity) tab for a material named 'Acer armadures passives'. It includes fields for 'Nombre', 'Descripción' (Acer 500 MPa), 'Clase' (Metal), 'Comentarios' (Inclós el recobriment amb epoxy), 'Palabras clave', 'Fabricante', 'Modelo', 'Coste' (1.5€/kg), 'URL', 'Nota clave', and 'Marca'. The right screenshot shows the 'Físico' (Physical) tab for 'Acero 500 MPa', detailing mechanical and thermal properties: 'Comportamiento' (Isótropo), 'Coeficiente de dilatación térmica' (0.00001 inv °C), 'Módulo de Young' (200.0 MPa), 'Coeficiente de Poisson' (0.30), 'Módulo cortante' (77:523.0 MPa), 'Densidad' (7:850.00 kg/m³), 'Límite de fluencia' (500.0 MPa), and 'Límite de elasticidad' (500.0 MPa). There is also a checkbox for 'Tratado térmicamente'.

Figura 42. Característiques de les armadures passives del WindCrete.

5.3 MODELITZACIÓ PARAMÈTRICA AMB CODI DYNAMO

Una de les característiques més importants per dur a terme el predimensionament de les estructures flotants offshore és poder determinar el centre de gravetat, el centre de flotació i el moment d'inèrcia de l'estructura. La metodologia emprada en l'apartat anterior només permet determinar la volumetria del formigó i del llast, sense tenir la possibilitat d'obtenir les propietats hidroestàtiques de la plataforma. Per aquesta raó, s'ha emprat un software associat a Revit anomenat Dynamo. Es tracta d'una eina de programació gràfica que permet definir els fluxes de treball i algorismes mitjançant nodes que contenen funcions.

D'una banda, s'ha fet un script visual on es seleccionen els diferents sòlids que conformen la geometria i s'uneixen en una única llista. Es separen els elements de formigó i el llast per poder calcular les respectives masses mitjançant els volums -computats amb el node de **Solid.Volume**- i els valors d'entrada de les densitats. Amb una mitjana ponderada de les masses de cada sòlid i el seu respectiu centroid -calculat amb el node **Solid.Centroid**- s'obté el centre de gravetat del WindCrete tal com es demostra a la següent Figura 43.

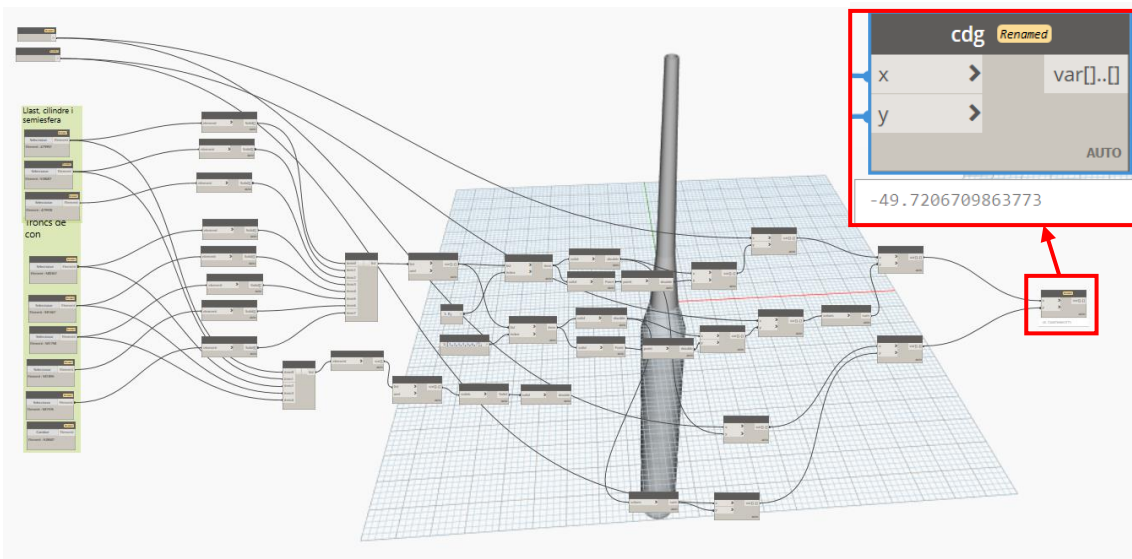


Figura 43. Script de programació gràfica per obtenir el centre de gravetat.

D'altra banda, s'ha usat l'eina de Dynamo per poder editar els paràmetres de les famílies creades anteriorment i proporcionar un procés més atractiu a l'usuari a l'hora d'entrar els inputs. Així, s'han usat diferents nodes per obtenir els paràmetres de la família i assignar-los el valor corresponent de les 30 variables diferents tal com s'il·lustra a la següent Figura 44 (amb **FamilyDocument.Parameters** i **FamilyDocument.SetParameterValueByName**).

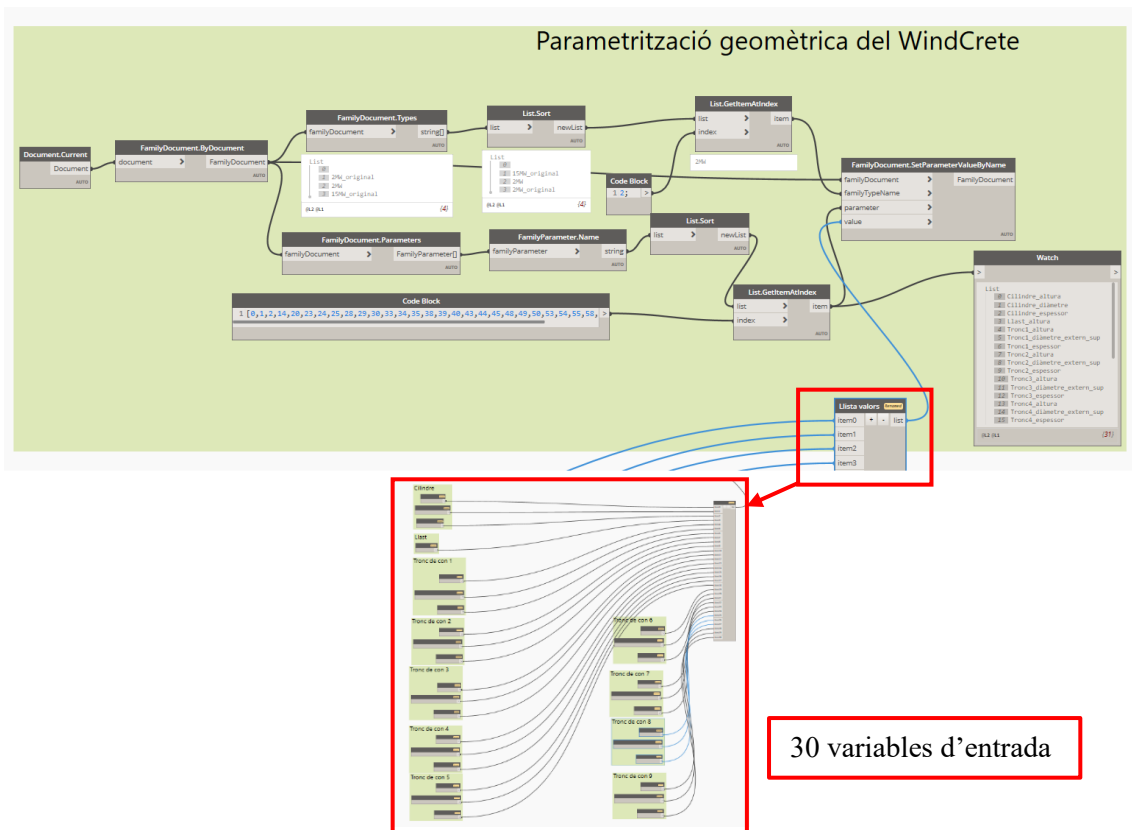


Figura 44. Script de programació gràfica per editar els paràmetres de la família WindCrete.

Finalment, tal com es mostra a la següent Figura 45, l'eina "Reproductor de Dynamo" permet assignar els valor dels nodes si aquests se'ls assigna la categoria d'entrada. Per tant, mitjançant la modelització amb Revit i la programació gràfica amb Dynamo, s'ha creat una forma àgil i eficient de crear les plataformes eòliques flotants WindCrete.

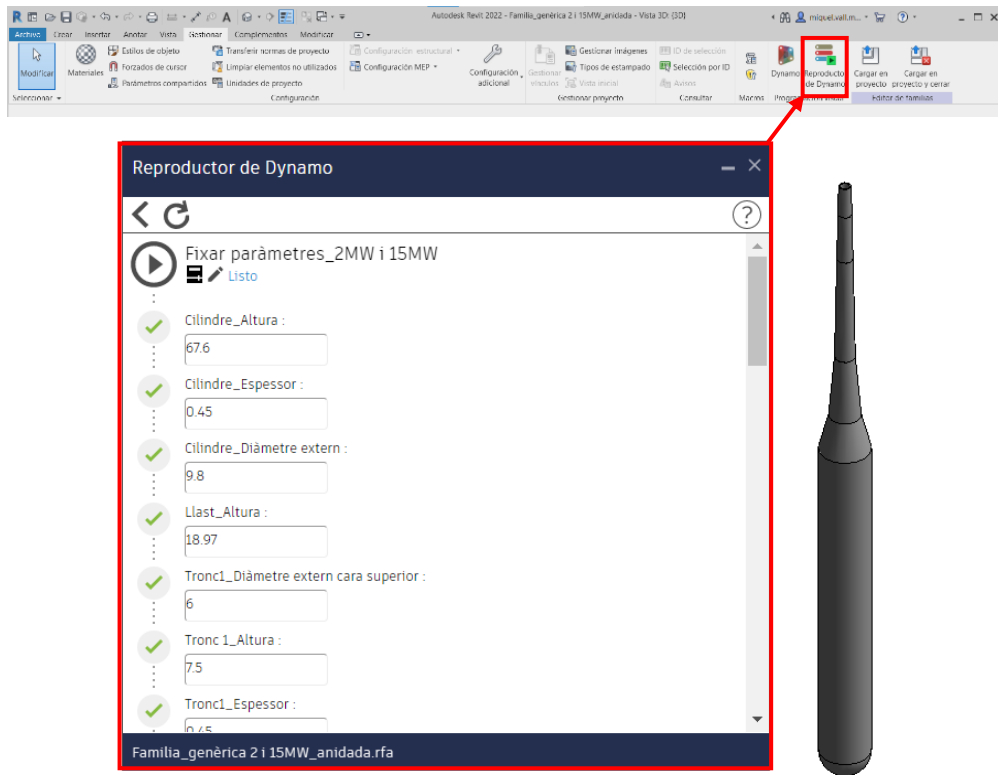


Figura 45. Valors d'entrada o inputs per parametritzar el WindCrete.

Per obtenir la inèrcia de l'estructura -un paràmetre essencial en l'anàlisi hidrodinàmica i en la verificació estructural-, s'ha hagut d'exportar el model Revit al programa Autodesk Autocad. Mitjançant l'eina **MASSPROP** s'obtenen els moments d'inèrcia de la plataforma així com altres propietats físiques d'interès (Figura 46).

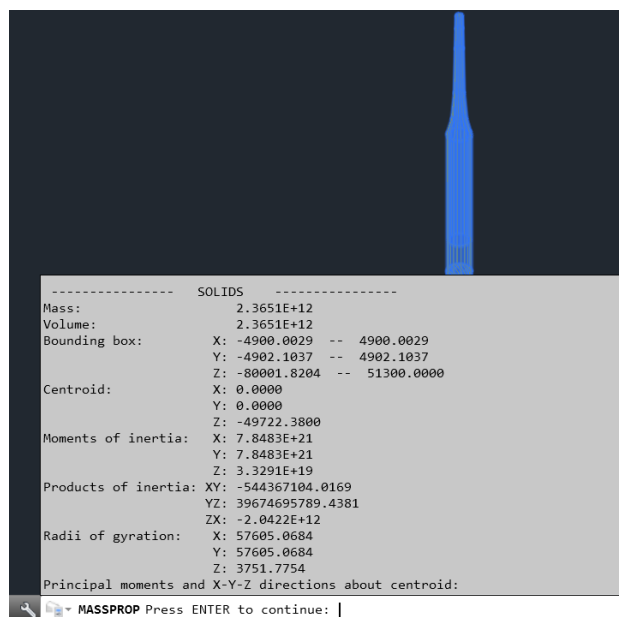


Figura 46. Model WindCrete 2 MW exportat a Autocad. Propietats físiques amb MASSPROP.

5.4 MODELITZACIÓ PARAMÈTRICA AMB CODI PYTHON

Una vegada s'ha parametritzat l'estructura del WindCrete mitjançant les eines del programari Revit i s'han extret algunes de les propietats més importants amb els softwares d'Autocad i Dynamo, s'ha volgut modelitzar les armadures passives i actives. En la línia com s'ha introduït en l'apartat 4.2.2.4, el WindCrete conté una malla d'armadura passiva d'acer B500 conformada per armadures longitudinals rectes i armadures transversals circulars; i una estructura de tendons d'acer Y-1860-S7 posttesats amb una forma longitudinal al llarg de l'altura de l'element.

Les eines que ofereix el Revit per modelar les armadures estructurals només es poden usar en arxius de projecte, és a dir, arxius que corresponen a projectes concrets sense la possibilitat de poder dur a terme una parametrització per aplicar l'armadura a qualsevol model. Addicionalment, només es permet la generació de l'armat passiu sense poder crear cables ni tendons amb seccions transversals de dimensions superiors a les barres corrugades típicament emprades (6-32mm).

En aquestes circumstàncies, s'ha optat per usar l'eina complementària de Dynamo, particularment el node de Python Script (Figura 47) per programar un codi que permeti la generació de models WindCrete amb la totalitat de l'armat. Alhora la programació proporciona un rigor més elevat ja que es permet compilar el codi de l'estructura en altres programes per dur a terme comprovacions.

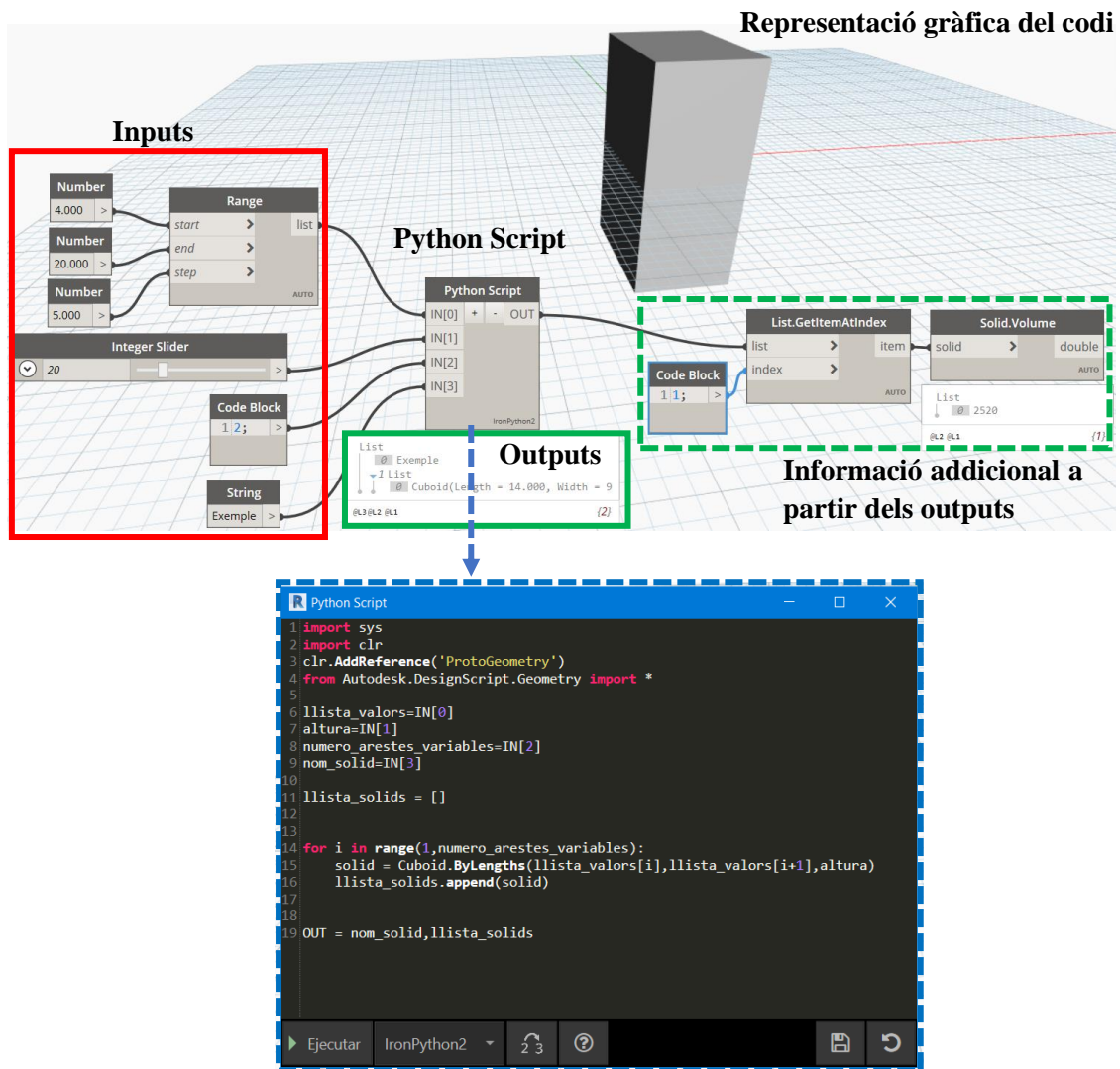


Figura 47. Exemple de l'ús del node Python Script.

Aquesta tercera metodologia no depèn de les famílies paramètriques generades anteriorment i és totalment independent a les dues metodologies descrites en els apartats previs. Tal com s’observa a la Figura 47, els valors d’entrada o *inputs* es defineixen amb els diferents nodes (llistes, números enters, text, etc.) i es criden en el codi mitjançant **IN[i]**. Els valors de sortida o *outputs* desitjats es poden escollir amb **OUT**. D’aquesta forma es creen diversos codis per modelar la geometria del WindCrete, les armadures passives i les armadures actives a partir de les variables d’entrada establertes en el següent apartat.

5.4.1 ESTRUCTURA WINDCRETE

En primera instància s’han creat totes les variables que permetran la generació de l’estructura de formigó, força semblants als usats prèviament en la modelització paramètrica amb Revit i Dynamo. Així els diferents elements contenen les següents variables d’entrada (Figura 48):

- **Estructura transició (Tronc de con 1):** Altura, Diàmetre exterior superior, Diàmetre exterior inferior i Espessor
- **Torre (Troncs de con a partir del 1r):** Altura, Diàmetre exterior superior i Espessor
- **Llast:** Altura (altura útil de material)
- **Flotador (Cilindre):** Altura



Figura 48. Variables d’entrada del codi WindCrete.

Tant la semiesfera com el cilindre no contenen variables d’entrada del diàmetre o l’espessor ja que aquestes característiques geomètriques venen determinades per l’estructura de transició.

A més s’han creat les variables de les respectives densitats del material de l’estructura monolítica i del llast així com una variable anomenada **n** on l’usuari pot determinar el nombre de troncs de con en què està formada l’estructura. Aquest últim input respon a la principal limitació del software de programació gràfica Dynamo: la impossibilitat de poder generar variables d’entrada. Tots els inputs d’un codi Python han d’estar creats prèviament creats sense tenir la possibilitat de crear-los mitjançant la programació. Així, es defineixen 10 troncs de con, 1 cilindre, 1 semiesfera i 1 llast, permetent a l’usuari determinar amb quants troncs de con es discretitzarà la plataforma.

El conjunt de 35 variables emprades s'agrupen en una única llista² mitjançant un node de Python Script, amb la finalitat de tenir un flux de treball més organitzat.

Aquesta llista de variables és l'únic input del Python Script anomenat Funció WindCrete, on es modela l'estructura de formigó. En el codi, primerament es criden les variables de la llista i es defineix una funció per la única geometria que requerirà d'un procés reiteratiu: el tronc de con (Figura 49). Aquesta funció empra diferents inputs per generar el perfil bidimensional de la figura i a continuació el sòlid mitjançant la revolució d'aquesta secció en alçat amb **Solid.ByRevolve**.

```

73 #Tronc de con
74 def tronc_de_con(elevacio,altura,diametre_inferior,diametre_superior,espessor):
75     punt1 = Point.ByCoordinates(diametre_inferior/2, 0, elevacio)
76     punt2 = Point.ByCoordinates(diametre_inferior/2-espessor, 0, elevacio)
77     punt3 = Point.ByCoordinates(diametre_superior/2-espessor, 0, elevacio+altura)
78     punt4 = Point.ByCoordinates(diametre_superior/2, 0, elevacio+altura)
79
80     llista_punts_perfil_tronc = [punt1,punt2,punt3,punt4]
81     perfil_tronc = Polygon.ByPoints([punt1,punt2,punt3,punt4])
82
83     punt_0 = Point.ByCoordinates(0,0,0)
84     vector_z=Vector.ByCoordinates(0,0,1)
85     angle_ini=0
86     angle_fin=360
87
88     tronc = Solid.ByRevolve(perfil_tronc, punt_0, vector_z, angle_ini, angle_fin)
89
90     return tronc
91

```

Figura 49. Funció per generar la geometria de tronc de con.

L'estructura de transició, en concret el primer tronc de con, té d'elevació -o desfasament respecte del pla de referència z=0- la seva altura en signe contrari, ja que ha d'estar ubicat just sota del nivell mig del mar. Una vegada definida la primera geometria, es duu a terme la iteració de la **funció tronc de con** fins al nombre de figures **n** definit per l'usuari (Figura 50). Totes les geometries creades s'agrupen en una llista anomenada **llista_sòlids** que serà la variable de sortida o output del codi.

```

94 ##Primer tronc de con
95 tronc_1 = tronc_de_con(-Tronc1_Altura,Tronc1_Altura,Tronc1_Diametre_inferior,Tronc1_Diametre_superior,Tronc1_Espessor)
96
97 llista_sòlids.append(tronc_1)
98
99
100 ##Bucle a partir del 2n tronc de con == tronc de con número i
101 elevacio=-Tronc1_Altura
102
103 for i in range(1,n):
104     elevacio=elevacio+llista_altures[i-1]
105     diametre_inf=llista_diametres_sup[i-1]
106     tronc_i=tronc_de_con(elevacio,llista_altures[i],diametre_inf,llista_diametres_sup[i],llista_espessors[i])
107
108     llista_sòlids.append(tronc_i)

```

Figura 50. Iteració segons el nombre de discretitzacions per generar la torre.

² **Llista**: en llenguatge de programació una llista és un element que s'utilitza per emmagatzemar un conjunt de dades. Es pot recuperar o "cridar" una dada concreta de la llista esmentant en quina posició es troba. Una de les particularitats del llenguatge Python és que la primera dada de la llista correspon a la posició 0.

A continuació, es creen les altres geometries mitjançant la mateixa eina de revolució. El procediment en tots els casos és idèntic: primer, es defineixen els diferents punts que conformaran el polígon en alçat bidimensional. Aquests punts es creen mitjançant les coordenades de les variables pertinents d'elevació/desfasament, altura, espessor o diàmetre. Es defineix el contorn del perfil de la figura mitjançant línies o arcs que es rotaran al voltant del vector unitari perpendicular al pla de referència per crear la geometria sòlida. A la Figura 51 es visualitza aquest procés amb l'element del llast i a l'Annex II es mostra el codi en la seva totalitat.

```

153 #Llast
154 llast_desfase=-Tronc1_Altura-Cilindre_Altura-Tronc1_Diametre_inferior/2+Tronc1_Espessor
155
156 centre_llast = Point.ByCoordinates(0,0,llast_desfase+Tronc1_Diametre_inferior/2-Tronc1_Espessor)
157 punt111 = Point.ByCoordinates(0, 0,llast_desfase)
158 punt112 = Point.ByCoordinates(0, 0,llast_desfase+Llast_Altura)
159 punt113 = Point.ByCoordinates(Tronc1_Diametre_inferior/2-Tronc1_Espessor, 0,llast_desfase+Llast_Altura)
160 punt114 = Point.ByCoordinates(Tronc1_Diametre_inferior/2-Tronc1_Espessor, 0,llast_desfase+Tronc1_Diametre_inferior/2-Tronc1_Espessor)
161
162 arc11 = Arc.ByCenterPointStartPointEndPoint(centre_llast,punt114,punt111)
163 linia11 = Line.ByStartPointEndPoint(punt111,punt112)
164 linia12 = Line.ByStartPointEndPoint(punt112,punt113)
165 linia13 = Line.ByStartPointEndPoint(punt113,punt114)
166
167 llista_linies_llast = [arc11,linia11,linia12,linia13]
168
169 perfil_llast = PolyCurve.ByJoinedCurves(llibra_linies_llast)
170 punt_0 = Point.ByCoordinates(0,0,0)
171 vector_z=Vector.ByCoordinates(0,0,1)
172 angle_ini=0
173 angle_fin=360
174
175 llast = Solid.ByRevolve(perfil_llast, punt_0, vector_z, angle_ini, angle_fin)
176
177 llista_solidos.append(llast)
    
```

Figura 51. Generació del llast.

Quan s’executa el codi, s’obté la geometria del WindCrete parametritzada segons les variables d’entrada esmentades anteriorment. Aquesta figura, es pot visualitzar en el programari Dynamo com una geometria sòlida i també està representada en el programari de l’entorn BIM Revit. No obstant, la representació en aquest últim, només consta de línies blaves que no es poden seleccionar ni editar ja que la figura creada no té associada cap categoria d’element estructural, arquitectònic ni d’instal·lacions (Figura 53 emmarcat color rosa).

Per aquesta raó, és imprescindible expandir el codi per crear una família de pilar estructural (Figura 53 emmarcat color blau) amb la **llista_solidos** creada amb la Funció WindCrete. D’aquesta forma, s’usa la funció **FamilyType.ByGeometry** per crear una família Revit. S’ha de definir la geometria sòlida unida, el nom de la família, la categoria de pilar estructura, la plantilla de “Model genèric mètric” i el material Formigó WindCrete.

Per tal de visualitzar aquesta família quan s’executa el codi, es crea una instància de la família, és a dir, s’insereix aquesta família al document de projecte Revit. Es posiciona el WindCrete de tal forma que l’únic element visible per sobre del nivell mig del mar sigui la torre, ubicant l’estructura a una posició de l’eix z corresponent a la suma d’altures del cilindre, estructura de transició i semiesfera.

A la següent Figura 52 es mostra el flux de treball per crear tots els elements esmentats i a la Figura 53 -com s’ha esmentat- s’il·lustra la representació gràfica de la geometria.

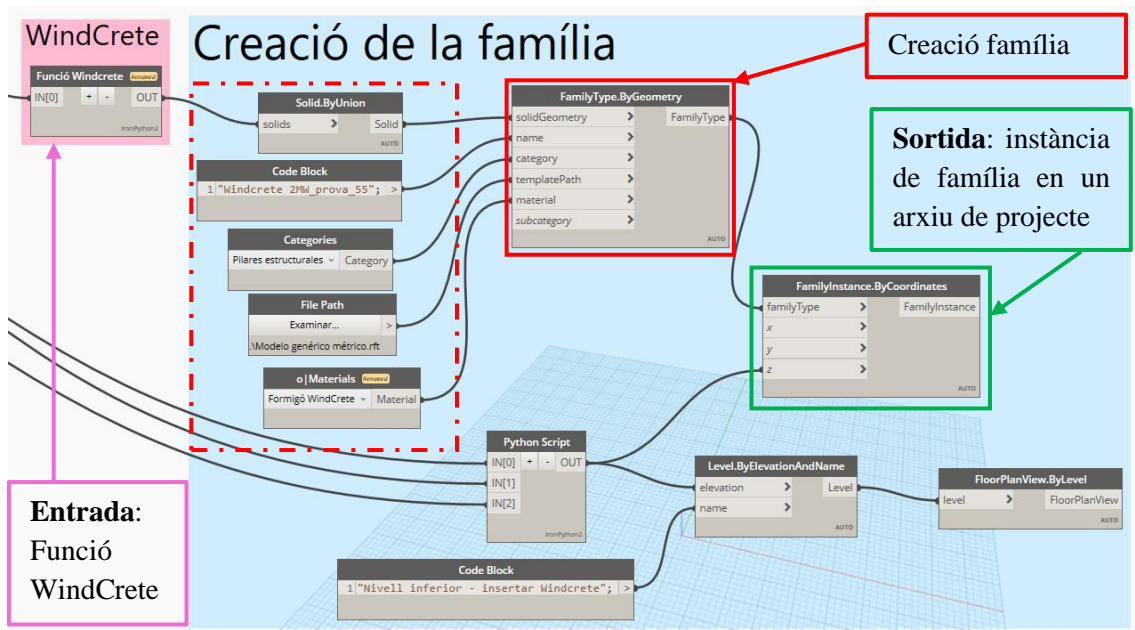


Figura 52. Flux de treball per crear famílies Revit i posicionar-les en un arxiu de projecte.

Quan es compila el codi, s’obté la família WindCrete corresponent de pilar estructural al Revit amb les dimensions, nom i material que desitgi l’usuari. No obstant, la interoperabilitat entre la geometria creada amb el Python i la seva representació amb família Revit comporta una altra limitació important. Tot i que es defineixen les unitats mètriques en ambdós programes, el software converteix la família creada en metres i la passa a la unitat de longitud de peus. Així, al Revit es visualitzen dos elements: la figura del WindCrete conformada mitjançant línies amb les dimensions correctes -inútil en l’aplicació del BIM- i la figura del WindCrete en forma d’instància de família de pilar estructural escalada amb un factor 3,28. Per resoldre aquesta problemàtica, a la **llista de variables** d’entrada, es divideixen totes les variables d’entrada que es refereixin a característiques geomètriques per un factor $(100/2,54)/12$ que correspon a la magnitud exacta de la conversió esmentada. D’aquesta manera, es contempla l’eficiència que comporta comptar amb una llista de variables i mantenir el codi principal exempt de variacions complementàries. Amb aquesta última modificació s’aconsegueix generar models WindCrete parametritzats (Figura 53).

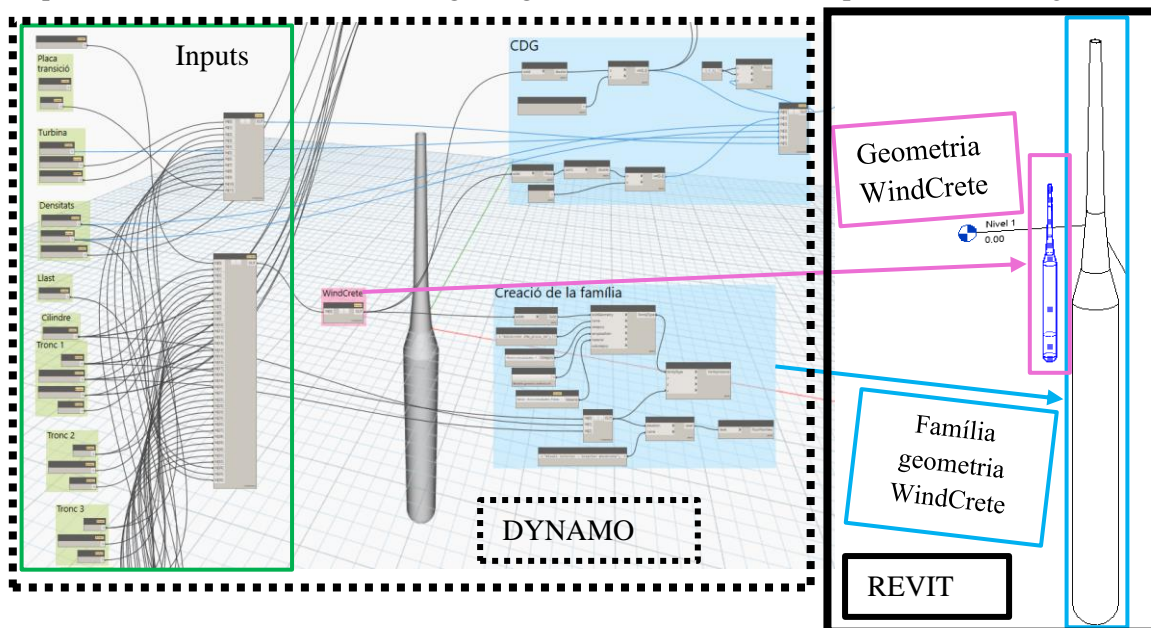


Figura 53. Traspàs de geometria Dynamo-Revit: diferència entre Python i famílies.

Finalment, s'extreuen les propietats més essencials en el predimensionament de les plataformes eòliques flotants: el volum de formigó, la massa de llast, el centre de gravetat, el centre de flotació i l'empenta (Figura 54). El volum i el centre de gravetat s'obtenen mitjançant funcions internes del Dynamo com **Solid.Volume** i **Solid.Centroid** respectivament. Addicionalment, es genera un codi Python per computar el centre de gravetat global mitjançant els volums, els centres de gravetat i les densitats de les respectives geometries discretitzades. D'aquesta manera, es permet la variació de la densitat del llast i del formigó i alhora es pot comprovar el valor obtingut amb l'eina de Dynamo. Les altres propietats hidroestàtiques es determinen mitjançant diferents codis Python que contenen les respectives equacions. Per últim, es crea un node per modelitzar el WindCrete sense l'element del llast per obtenir les característiques físiques d'inèrcia i centre de gravetat considerant exclusivament l'estructura monolítica de formigó.

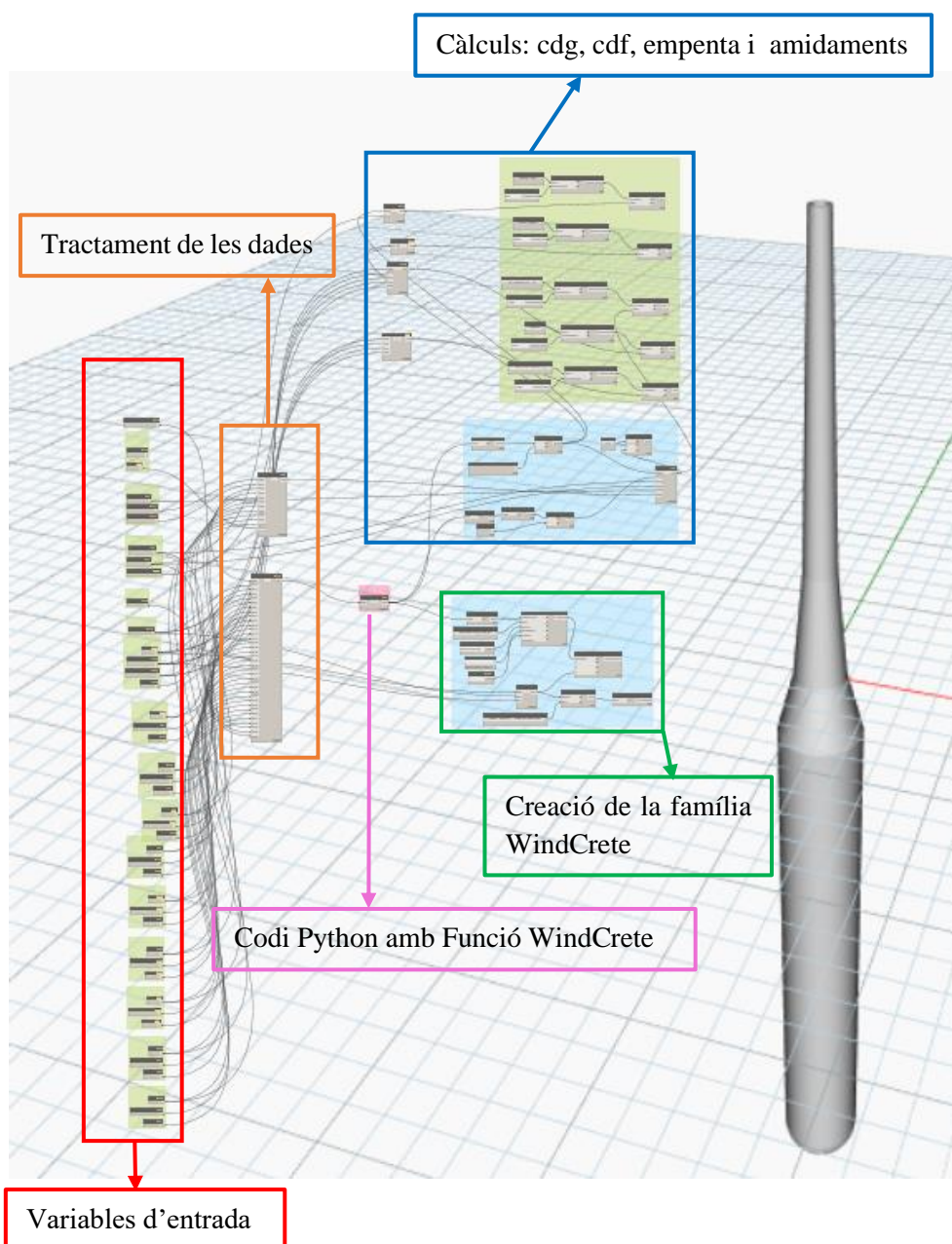


Figura 54. Codi de programació visual per obtenir la geometria i informació del WindCrete.

5.4.2 ARMADURES PASSIVES

L'estructura de l'armat passiu està formada per un conjunt de barres d'acer que permeten augmentar la resistència a flexió i a tallant de la secció de formigó. Aquestes barres se situen dins de les parets de la plataforma monolítica i es disposen prèviament al formigonat de l'estructura.

Es diferencien principalment dos tipus de barra segons la seva geometria:

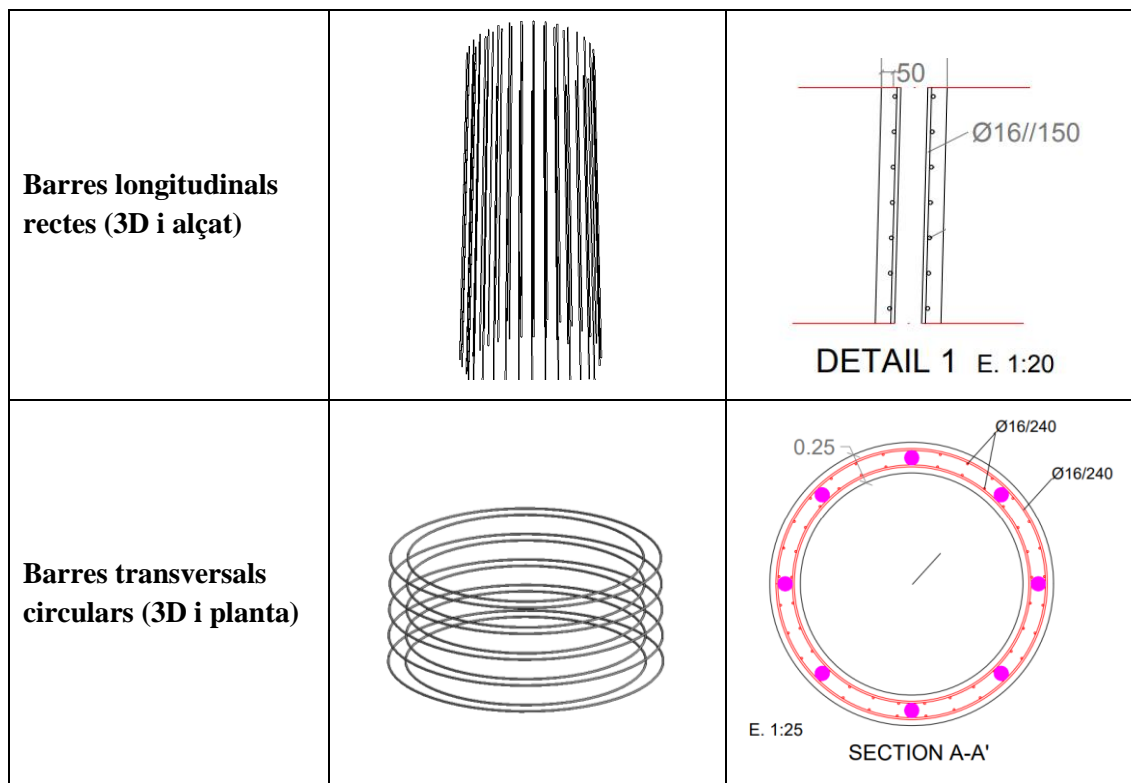


Figura 55. Tipologies d'armat passiu: barres rectes i barres circulars.

Tal com es mostra en aquestes il·lustracions anteriors, cada tipologia d'armadura es troba a la paret interior i exterior del WindCrete, tenint un total de 4 estructures a modelar. Aquestes armadures es troben a una distància de la superfície externa i interna corresponent al recobriment que requereixi el formigó segons la classe d'exposició d'aquest. L'ambient marí, que comporta la corrosió per l'atac de clorurs, i la constant afectació de l'onatge a les plataformes edífiques flotants impliquen haver de considerar el cas més restrictiu: la classe d'exposició XS3 (tots els càlculs de les característiques, taules i normativa relacionats amb el formigó estan detallats a l'Annex III). Per consegüent, el recobriment mínim en les estructures WindCrete de formigó pretensat amb adicions de fum de sílice superiors al 6% i vida útil de 50 anys, correspon a 50 mil·límetres. El recobriment nominal, és a dir, la distància que s'haurà de definir als plànols estructurals per garantir aquest valor mínim, consta d'un terme addicional al recobriment mínim segons el control d'execució en el formigonat. En aquest cas es pot considerar un valor nul al tractar-se d'una estructura executada amb un control i rigor intens en les instal·lacions d'un dic sec. D'aquesta forma, el recobriment per tenir en compte en el disseny de l'estructura és 50 mm.

Les armadures rectes segueixen paral·lelament l'alçat de l'estructura, és a dir, les superfícies exteriors i interiors. Per aquesta raó, en els diferents trams de tronc de con es produiran discontinuïtats de l'armat longitudinal degut a les diferents inclinacions de les armadures. Les barres dels diferents trams s'hauran de solapar una longitud determinada amb la finalitat d'assegurar la correcta transmissió d'esforços entre el formigó i l'acer, i perquè no hi hagi zones

crítiques on es pugui produir una potencial fallada local. Segons la Instrucció Espanyola de Formigó Estructural (EHE-08), en el cas del WindCrete 2 MW amb armadures $\phi 16$ la longitud d'ancoratge s'obté una longitud de solapament de 315 mil·límetres, mentre que en el WindCrete 15 MW amb armadures $\phi 20$ aquesta longitud augmenta fins a 396 mil·límetres.

A més, les barres d'acer corrugat longitudinals tenen la peculiaritat que van disminuint en número al llarg de l'altura de la plataforma ja que estan definides mitjançant l'espaiament perimetral entre elles i els diàmetres varien linealment. El màxim nombre d'armadures es trobarà a les seccions més sol·licitades -i amb major diàmetre- que se situen a la part inferior de la torre, mentre que la part superior -amb menor diàmetre- implicarà que el nombre de barres sigui alhora menor. A fi de garantir la correcta transmissió d'esforços amb els solapaments, el nombre d'armadures només podrà disminuir a la meitat quan l'armadura requerida ho permeti. Així, en el modelatge, la variable d'entrada serà el nombre d'armadures per cada tram, implicant que l'usuari ha de determinar aquesta magnitud en base a l'espaiament entre armadures indicat als plànols.

Per dur a terme la generació paramètrica d'elements d'armadura estructural, s'ha emprat el node del paquet "Structural Design" **Create.FromCurve**. Aquesta funció usa un conjunt de corbes, la seva normal, l'element on es disposarà l'armat i les característiques bàsiques de les armadures (diàmetre, tipus d'armadura -barra o estrep-, tipus d'ancoratge, i tipus de ganxo amb la corresponent orientació) com a variables d'entrada (Figura 56). Així, el flux de treball serà definir les variables d'entrada necessàries, generar un codi Python per crear les corbes de cada tipus d'armadura i finalment crear les armadures estructurals editables al Revit mitjançant el node citat.

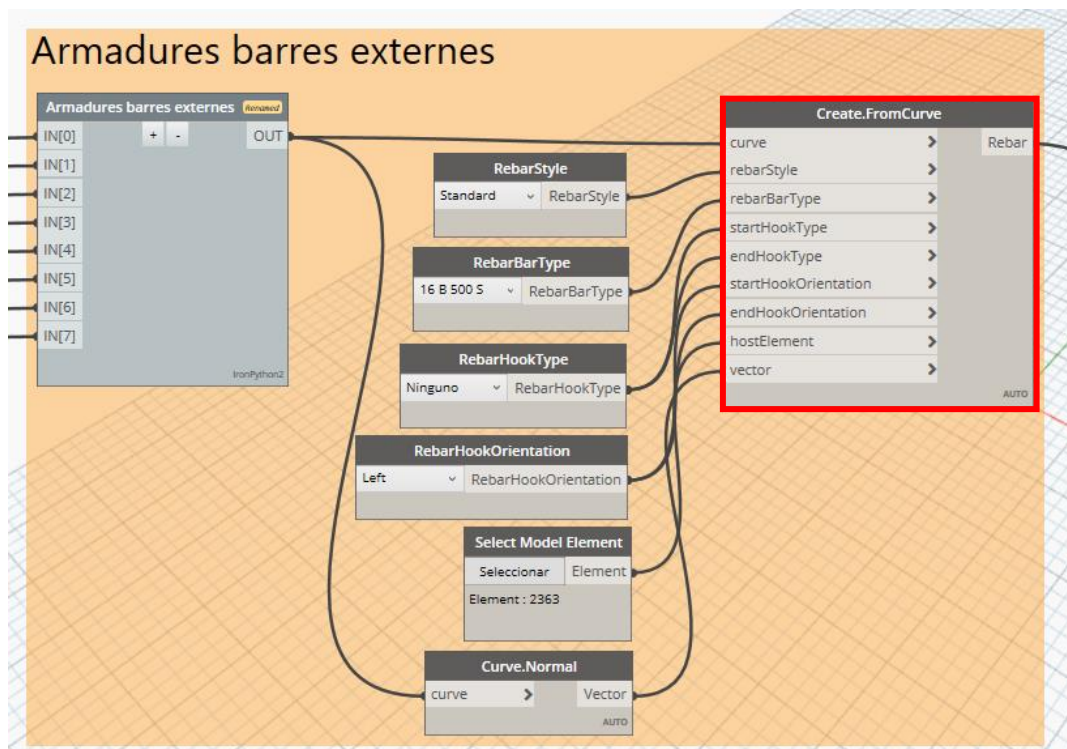


Figura 56. Node de Dynamo per crear l'armadura estructural a partir de corbes.

D'una banda, es necessita indicar les característiques geomètriques del WindCrete per poder situar les armadures a la posició desitjada. L'usuari ha de determinar els diàmetres exteriors, les espessors, les alçades (la posició de la cara superior de cada element) i els recobriments pertinents.

D'altra banda, el codi s'ha d'executar segons les característiques intrínseques dels respectius tipus d'armadures, és a dir, l'espaiament de les armadures transversals, el diàmetre, el número d'armadures longitudinals i els solapaments o recobriments superiors i inferiors. Per dur a terme el procés de parametrització més atractiu de cara a l'usuari, s'opta per determinar totes les variables d'entrades en una fulla d'Excel (Figura 57) i emprar el node **Data.ImportExcel** perquè el software Dynamo llegeixi els inputs. Posteriorment, mitjançant un conjunt de nodes - principalment **List.DropItems** i **List.GetItemAtIndex**- es filtren les diverses variables de forma organitzada. D'aquesta forma, l'usuari no interactua en cap moment amb el codi de programació visual Dynamo de la anterior Figura 56 excepte per executar el codi.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Element	Diàmetre superior ext	Diàmetre superior int	Espessor	Posició cara sup	Número armad	Espaiament	Diàmetre armadures long	Diàmetre armadures trans
2	Ref	9,8	8,9	0,45	-75,1	-	-	-	-
3	Cilindre	9,8	8,9	0,45	-7,5	128	0,2	0,016	0,016
4	Tronc1	6	5,1	0,45	0	128	0,2	0,016	0,016
5	Tronc2	3,8	3	0,4	13	128	0,2	0,016	0,016
6	Tronc3	2,95	2,25	0,35	35	64	0,2	0,016	0,016
7	Tronc4	2,56	1,96	0,3	45	64	0,24	0,016	0,016
8	Tronc5	2,32	1,82	0,25	51,3	32	0,24	0,016	0,016

	J	K	L	M	N	O	P
9	Solapament superior extern	Solapament inferior extern	Solapament superior intern	Solapament inferior intern	Recobriment lateral extern	Recobriment lateral intern sup	Recobriment lateral intern inf
10	-0,315	0	-0,315	0	0,05	0,05	0,05
11	-0,315	-0,315	-0,315	-0,315	0,05	0,05	0,05
12	-0,315	-0,315	-0,315	-0,315	0,05	0,05	0,05
13	-0,315	-0,315	-0,315	-0,315	0,05	0,05	0,05
14	-0,315	-0,315	-0,315	-0,315	0,05	0,05	0,05
15	0,05	-0,315	0,05	-0,315	0,05	0,05	0,05

Figura 57. Variables d'entrada per l'armat passiu.

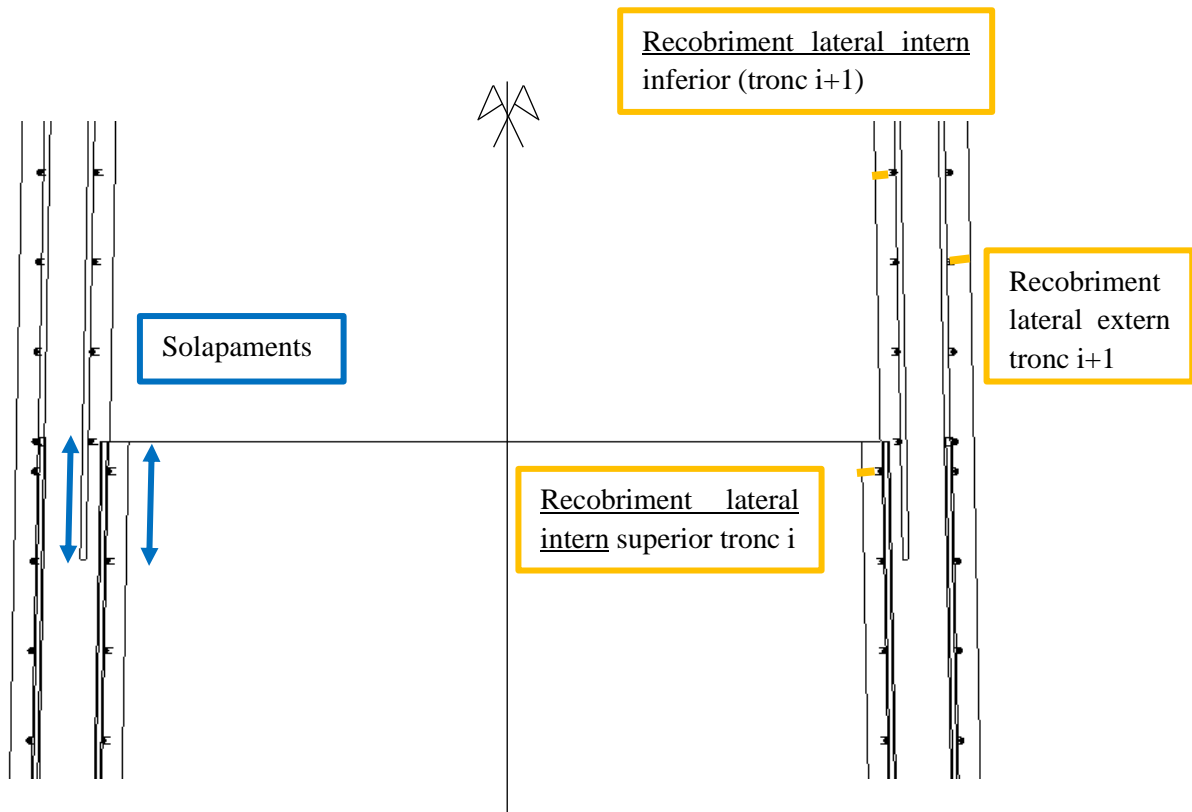


Figura 58. Solapaments i recobriments.

○ **Barres longitudinals rectes**

Aquestes armadures empen les variables d'entrada de la geometria discretitzada del WindCrete, el nombre d'armadures que discorren en cadascun d'aquests trams, els recobriments i solapaments respectius, i els diàmetres tant de les armadures longitudinals objecte del codi en qüestió com de les armadures circulars. Aquesta última variable és essencial ja que les armadures circulars engloben l'armat longitudinal i, per aquest motiu, la posició d'aquest últim ve determinat per les armadures circumdants.

D'aquesta forma, es duu a terme una iteració per cada tram del WindCrete on es criden les variables de les llistes pertinents. Es genera l'armat en cada tram mitjançant una matriu circular³ de línies creades amb l'eina **Line.ByStartPointEndPoint** i rotades amb **Geometry.Rotate**. L'angle de rotació entre cada línia de la matriu circular consta de 360/num_armadures. Per realitzar la modelització, s'han separat les armadures rectes (del cilindre) de les armadures inclinades (dels troncs de con) que segueixen el pendent de les respectives cares. Això es duu a terme mitjançant una declaració condicional **if** que discerneix els elements on el radi superior és igual a l'inferior (cilindre, Figura 59) de les geometries que no compleixen aquesta condició (troncs de con, Figura 60). Cada conjunt d'armadures creat en les respectives iteracions s'adjunta en una llista que serà el valor de sortida del codi.

```

7 llista_z = IN[0] #len+1
8 llista_d = IN[1] #len+1
9 llista_num_armadures = IN[2]
10 llista_rec_sup = IN[3]
11 llista_rec_inf = IN[4]
12 llista_rec_lat = IN[5]
13 diametre_armadura_circular = IN[6]
14 diametre_armadura_barra = IN[7]
15
16 num_solids = len(llibra_d)-1
17 llista_armadures_tronc = []
18
19 for i in range(0,num_solids):
20
21     desfasament_armadures = diametre_armadura_circular[i]/2+diametre_armadura_barra[i]/2
22     r_sup = llista_d[i+1]/2
23     r_inf = llista_d[i]/2
24     rec_sup = llista_rec_sup[i]
25     rec_inf = llista_rec_inf[i]
26     rec_lat = llista_rec_lat[i]
27     h = llista_z[i+1]-llibra_z[i]
28     z_sup = llista_z[i+1]
29     z_inf = llista_z[i]
30     num_armadures = int(llibra_num_armadures[i])
31
32     if r_sup-r_inf == 0:
33
34         r_sup_rec_lat = r_sup - rec_lat - desfasament_armadures
35         r_inf_rec_lat = r_inf - rec_lat - desfasament_armadures
36
37         p1 = Point.ByCoordinates(r_sup_rec_lat,0,z_sup-rec_sup)
38         p2 = Point.ByCoordinates(r_inf_rec_lat,0,z_inf+rec_inf)
39
40         l = Line.ByStartPointEndPoint(p1,p2)
41         o = Point.ByCoordinates(0,0,0)
42         v = Vector.ByCoordinates(0,0,1)
43         step = 360/num_armadures
44         angle = range(0,360,step)
45
46         for a in angle:
47             armadura = Geometry.Rotate(l,o,v,a)
48             llista_armadures_tronc.append(armadura)
49
50

```

Figura 59. Generació de l'armat passiu de barres rectes (cilindre).

³ En el programari Revit, s'anomena **matriu circular (circular array)** a una agrupació d'elements en disposició circular. S'obté mitjançant la repetició d'un element segons un cert angle azimuthal.


```

51     else:
52
53         r_sup_rec_sup = r_sup+(rec_sup/(h/(r_inf-r_sup)))
54         r_inf_rec_inf = r_inf-(rec_inf/(h/(r_inf-r_sup)))
55
56         alpha = math.atan(h/(r_inf-r_sup))
57         r_sup_rec_sup_lat = r_sup_rec_sup-(rec_lat/math.sin(alpha))-(desfasament_armadures/math.sin(alpha))
58         r_inf_rec_inf_lat = r_inf_rec_inf-(rec_lat/math.sin(alpha))-(desfasament_armadures/math.sin(alpha))
59
60         p1 = Point.ByCoordinates(r_sup_rec_sup_lat,0,z_sup-rec_sup)
61         p2 = Point.ByCoordinates(r_inf_rec_inf_lat,0,z_inf+rec_inf)
62
63         l = Line.ByStartPointEndPoint(p1,p2)
64         o = Point.ByCoordinates(0,0,0)
65         v = Vector.ByCoordinates(0,0,1)
66         step = 360/num_armadures
67         angle = range(0,360,step)
68
69         for a in angle:
70             armadura = Geometry.Rotate(l,o,v,a)
71             llista_armadures_tronc.append(armadura)
72
73 OUT = llista_armadures_tronc

```

Figura 60. Generació de l'armat passiu de barres rectes (tronc de con).

○ **Barres transversals circulars**

L'altre tipologia d'armadures utilitza les mateixes variables d'entrada excepte que el nombre d'armadures està determinat directament per l'espaiament entre armadures de cada tram sense la necessitat d'efectuar càlculs addicionals. La principal diferència del present codi és que les armadures estan formades per geometries d'arc ja que el node **Create.FromCurve** no permet emprar geometries corbes circulars.

Primer, es determinen les llistes d'inputs pertinents i a continuació es duu a terme la iteració respecte del nombre d'elements en què es desglossa la geometria WindCrete. En aquest bucle primerament es criden les variables de les llistes, es determina el nombre d'armadures segons l'espaiament i es computa el desfasament que sorgeix degut a la imprecisió entre el nombre d'armadures i l'altura de l'element. Després, es torna a separar entre les armadures de geometria constant (cilindre) i les armadures de geometria variable (troncs de con). Per generar els arcs en cada cas es necessita determinar el seu centre, el radi, l'angle d'escombrada i el pla on es situarà l'arc, mitjançant la definició d'un vector normal a aquest. En el cas del cilindre, el radi de l'arc és el radi del cilindre considerant el recobriment lateral de 50 mil·límetres. En el cas dels troncs de con s'ha de fer una iteració per tot el nombre d'armadures de l'element on es tingui en compte la contribució del pendent de les cares. Una vegada es tenen els radis, es generen els arcs que conformen una unitat d'armadura, un arc de 0 a 180 graus i un altre de 180 a 360 graus. En cada bucle s'afegeixen els respectius arcs a una llista que és l'output del codi. A la Figura 61 es mostra el codi en la seva totalitat.

```

8 llista_z = IN[0] #len+1
9 llista_diametres = IN[1] #len+1
10 llista_espaiaments = IN[2]
11 llista_recobriments_sup = IN[3]
12 llista_recobriments_inf = IN[4]
13 llista_recobriments_lat = IN[5]
14
15 num_solidos = len(llista_diametres)-1
16 llista_radis_armadures = []
17 arcs = []
18 llista_nombre_armadures = []
19 llista_nombre_armadures_acumulat = []
20
21
22 for i in range(0,num_solidos):
23     h = llista_z[i+1]-llista_z[i]
24     z_sup = llista_z[i+1]
25     z_inf = llista_z[i]
26     radi_sup = (llista_diametres[i+1])/2
27     radi_inf = (llista_diametres[i])/2
28     rec_sup = llista_recobriments_sup[i]
29     rec_inf = llista_recobriments_inf[i]
30     rec_lat = llista_recobriments_lat[i]
31     espaiament = llista_espaiaments[i]
32
33     nombre_armadures = ((h-rec_sup-rec_inf)/espaiament)+1
34     n = int(nombre_armadures)
35
36     llista_nombre_armadures.append(n)
37     armadures_acumulades = sum(llista_nombre_armadures)
38     llista_nombre_armadures_acumulat.append(armadures_acumulades)
39
40     dif = (nombre_armadures - n)*espaiament/2
41
42
43     if radi_sup - radi_inf == 0:
44
45         radi_inicial_inf_lat = radi_inf-rec_lat
46         llista_radis_armadures.append(radi_inicial_inf_lat)
47
48         for t in range(1,n):
49             radi_armadura = radi_inicial_inf_lat
50             llista_radis_armadures.append(radi_armadura)
51
52         for m in range(0,n):
53             z = z_inf+rec_inf+dif+m*espaiament
54             cent = Point.ByCoordinates(0,0,z)
55             rad = llista_radis_armadures[m]
56             normal = Vector.ByCoordinates(0,0,1)
57             arc1 = Arc.ByCenterPointRadiusAngle(cent,rad,0,180,normal)
58             arc2 = Arc.ByCenterPointRadiusAngle(cent,rad,180,360,normal)
59             arcs.append(arc1)
60             arcs.append(arc2)
61
62     else:
63         alpha = (math.atan(h/(radi_inf-radi_sup)))
64
65         radi_inicial_inf = radi_inf-((rec_inf+dif)/(h/(radi_inf-radi_sup)))
66         radi_inicial_inf_lat = radi_inicial_inf-(rec_lat/math.sin(alpha))
67         llista_radis_armadures.append(radi_inicial_inf_lat)
68
69         for b in range(1,n):
70             radi_armadura = radi_inicial_inf_lat-(b*espaiament/(h/(radi_inf-radi_sup)))
71             llista_radis_armadures.append(radi_armadura)
72
73
74         for r in range(0,n):
75             z = z_inf+rec_inf+dif+r*espaiament
76             cent = Point.ByCoordinates(0,0,z)
77             radi = llista_radis_armadures[llista_nombre_armadures_acumulat[i-1]+r]
78             normal = Vector.ByCoordinates(0,0,1)
79             arc1 = Arc.ByCenterPointRadiusAngle(cent,radi,0,180,normal)
80             arc2 = Arc.ByCenterPointRadiusAngle(cent,radi,180,360,normal)
81             arcs.append(arc1)
82             arcs.append(arc2)
83
84 OUT = arcs

```

Figura 61. Generació de l'armat passiu de barres circulars.

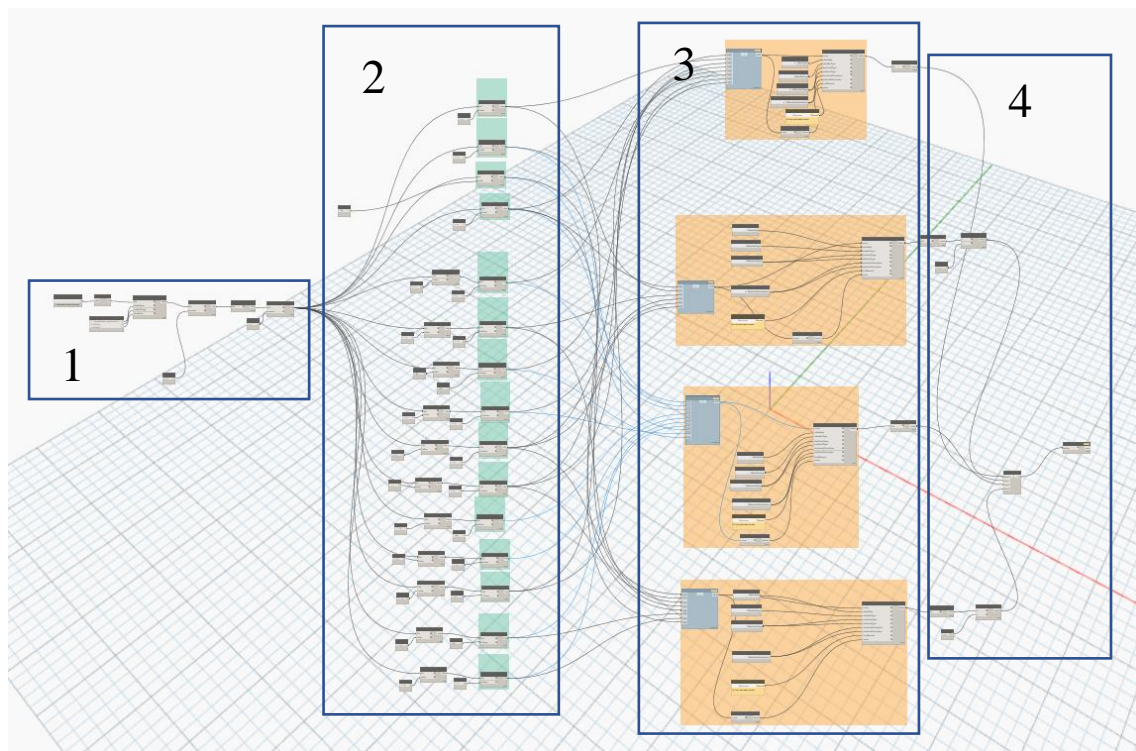


Figura 62. Codi de programació visual per modelar les armadures passives.

1. **Obtenció de les variables d'entrada** mitjançant les dades de l'Excel i filtratge;
2. **Separació** de les variables d'entrada amb el node de **GetItemAtIndex**;
3. **Generació** de les armadures longitudinals rectes exteriors i interiors i de les armadures transversals circulars exterior i interiors;
4. **Càlcul** del nombre de barres per comprovar els amidaments obtinguts amb la taula de planificació Revit.

5.4.3 ARMADURES ACTIVES

Les armadures actives s'ubiquen dins de la secció de formigó i consten de tendons d'acer, és a dir, un conjunt de cordons o cables, els quals se'ls aplica una força externa de pretensat en forma de tracció per tal que l'estructura de formigó inicialment estigui sotmesa a compressió. La transmissió d'esforços es duu a terme mitjançant la instal·lació de plaques d'ancoratge, perquè una vegada es deixi d'aplicar la tracció als tendons i aquests vulguin recuperar la seva longitud inicial, impliquin la compressió de la peça de formigó. Aquest mètode es va desenvolupar a mitjans del segle passat i ha revolucionat el disseny d'estructures amb grans llums sol·licitades a flexió. En el cas particular del WindCrete, el procés de pretensat es realitza una vegada el formigó ja està endurit implicant que les armadures siguin posttesades. Així, el modelatge tridimensional de l'armat actiu permet determinar les cavitats dels tendons que s'han de considerar en el procés de construcció per ubicar-hi posteriorment els cordons i equips de posttesat pertinents.

L'estructura de l'armat actiu del WindCrete consta de tres conjunts de tendons on cada conjunt comparteix el diàmetre, la pressió inicial de pretensat, el nombre de cordons per tendó i la seva longitud. S'observa que al llarg de la plataforma hi ha trams on només s'hi ubica una agrupació en particular mentre que hi ha altres trams on els tres conjunts actuen de forma simultània (Figura 63). Per aquesta raó, les longituds dels diferents tendons en alçat són diferents. Si es considera una de les agrupacions com a referència, les altres dues es troben rotades un cert angle en planta.

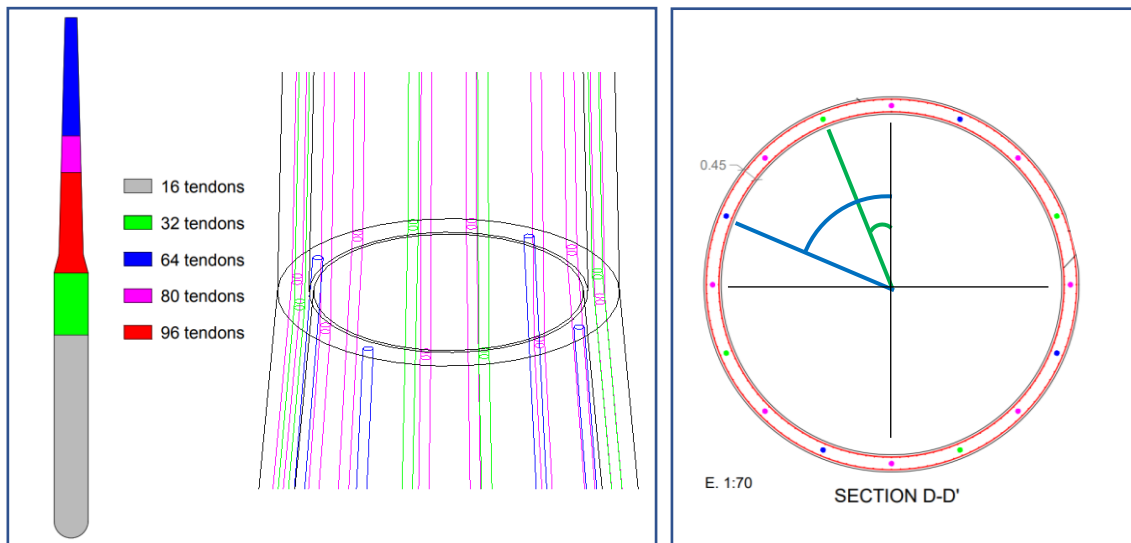


Figura 63. Variabilitat de l'armat actiu al llarg del WindCrete (esquerra) i rotació dels tendons (dreta).

En la línia dels dos apartats previs, primerament s’han de determinar les variables d’entrada i generar els codis Python corresponents. En aquest cas, es torna a emprar una fulla d’Excel -per cada conjunt d’armadures- per agilitzar el procés d’inserció d’inputs. Les variables d’entrada consten de la geometria del WindCrete amb els diàmetres, espessors i posicions de les cares superiors corresponents; i de les característiques geomètriques de les armadures i de la seva disposició, és a dir, el seu diàmetre, els recobriments, el nombre d’armadures, el nombre de sòlids amb armadura i la rotació antihorària del conjunt respecte del nord en graus. En el cas del WindCrete 2 MW es tenen els següents valors descrits a la Figura 64.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Element	Diàmetre sup	Espessor	Posició cara s	Número arm	Diàmetre arm	Recobriments	Recobriments	Rotació respe	Número sòlids amb armadura	
2	Referència	9,8	0,45	-54,7	-	-	-	-	0	6	
3	Cilindre	9,8	0,45	-7,5	8	0,115	0,05	0,05			
4	Tronc1	6	0,45	0	8	0,115	0,05	0,05			
5	Tronc2	3,8	0,4	13	8	0,115	0,05	0,05			
6	Tronc3	2,95	0,35	35	8	0,115	0,05	0,05			
7	Tronc4	2,56	0,3	45	8	0,115	0,05	0,05			
8	Tronc5	2,32	0,25	51,3	8	0,115	0,05	0,05			

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Element	Diàmetre sup	Espessor	Posició cara s	Número arm	Diàmetre arm	Recobriments	Recobriments	Rotació respe	Número sòlids amb armadura	
2	Referència	9,8	0,45	-75,1	-	-	-	-	67,5	3	
3	Cilindre	9,8	0,45	-7,5	4	0,115	0,05	0,05			
4	Tronc1	6	0,45	0	4	0,115	0,05	0,05			
5	Tronc2	3,8	0,4	13	4	0,115	0,05	0,05			
6	Tronc3	2,95	0,35	35	4	0,115	0,05	0,05			
7	Tronc4	2,56	0,3	45	4	0,115	0,05	0,05			
8	Tronc5	2,32	0,25	51,3	4	0,115	0,05	0,05			

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Element	Diàmetre sup	Espessor	Posició cara s	Número arm	Diàmetre arm	Recobriments	Recobriments	Rotació respe	Número sòlids amb armadura	
2	Referència	9,8	0,45	-75,1	-	-	-	-	22,5	4	
3	Cilindre	9,8	0,45	-7,5	4	0,115	0,05	0,05			
4	Tronc1	6	0,45	0	4	0,115	0,05	0,05			
5	Tronc2	3,8	0,4	13	4	0,115	0,05	0,05			
6	Tronc3	2,95	0,35	35	4	0,115	0,05	0,05			
7	Tronc4	2,56	0,3	45	4	0,115	0,05	0,05			
8	Tronc5	2,32	0,25	51,3	4	0,115	0,05	0,05			

Figura 64. Variables d’entrada dels tres diferents conjunts de tendons (exemple WindCrete 2 MW).

El codi generat per modelar la geometria de l’armat actiu (Figura 65), és força similar a l’emprat en la generació de les armadures passives longitudinals. En aquest cas, també es duu a terme un bucle segons el nombre de sòlids i se separen les armadures rectes de les inclinades segons la diferència dels radis. La principal diferència, és que aquest cas pretén generar una geometria sòlida mentre que en l’altra situació es creaven corbes unidimensionals. Per cada tipus de figura (cilindre – geometria recta o tronc de con – geometria inclinada), es generen ambdues cares de cada tendó estructural amb la funció de **Circle.ByCenterPointRadius** i es crea posteriorment el sòlid mitjançant una fusió⁴ realitzada amb **Solid.ByLoft**. A continuació, es genera la matriu circular amb l’angle inicial determinat segons la rotació del conjunt respecte la referència del nord. En el procés iteratiu per formar la matriu circular, també es modela el sòlid que proporciona la unió entre els tendons de cada tram perquè cada tendó sigui un element sense discontinuïtats. D’aquesta forma, s’obté l’estructura de l’armat actiu considerant els diàmetres de les baines per on discorreran diferents cordons que configuren un tendó.

⁴ **Fusió**: generació de la geometria sòlida definint tant les seccions transversals inicial i final (apartat 5.2.1).

```

1 import sys
2 import clr
3 clr.AddReference('ProtoGeometry')
4 from Autodesk.DesignScript.Geometry import *
5 import math
6
7
8 llista_d_ext = IN[0] #len+1
9 llista_espessors = IN[1]
10 llista_z = IN[2] #len+1
11 llista_diametres_armadura_activa = IN[3]
12 llista_rec_sup = IN[4]
13 llista_rec_inf = IN[5]
14 angle_inicial = IN[6]
15 llista_num_armadures = IN[7]
16 num_solid_s_armadura = IN[8]
17
18 num_solid_s = int(num_solid_s_armadura)
19
20 rotacio_nord = int(angle_inicial)
21 llista_armadures_tronc = []
22 llista_cares_sup = []
23 llista_ensolapaments = []
24
25 for i in range(0,num_solid_s):
26
27     r_sup = llista_d_ext[i+1]/2-llista_espessors[i+1]/2
28     r_inf = llista_d_ext[i]/2-llista_espessors[i]/2
29     rec_sup = llista_rec_sup[i]
30     rec_inf = llista_rec_inf[i]
31     h = llista_z[i+1]-llista_z[i]
32     z_sup = llista_z[i+1]
33     z_inf = llista_z[i]
34     num_armadures = int(llista_num_armadures[i])
35     radi_armadura = llista_diametres_armadura_activa[i]/2
36
37     if r_sup-r_inf == 0:
38
39         cent1 = Point.ByCoordinates(r_sup,0,z_sup-rec_sup)
40         cent2 = Point.ByCoordinates(r_inf,0,z_inf+rec_inf)
41
42         circle1 = Circle.ByCenterPointRadius(cent1,radi_armadura)
43         circle2 = Circle.ByCenterPointRadius(cent2,radi_armadura)
44
45         llista_cares_sup.append(circle1)
46
47         l=Solid.ByLoft([circle1,circle2])
48         o = Point.ByCoordinates(0,0,0)
49         v = Vector.ByCoordinates(0,0,1)
50         step = 360/num_armadures
51         angle = range(rotacio_nord,rotacio_nord+360,step)
52
53         for a in angle:
54             armadura = Geometry.Rotate(l,o,v,a)
55             llista_armadures_tronc.append(armadura)
56
57     else:
58
59         r_sup_rec_sup = r_sup+(rec_sup/(h/(r_inf-r_sup)))
60         r_inf_rec_inf = r_inf-(rec_inf/(h/(r_inf-r_sup)))
61
62         cent1 = Point.ByCoordinates(r_sup_rec_sup,0,z_sup-rec_sup)
63         cent2 = Point.ByCoordinates(r_inf_rec_inf,0,z_inf+rec_inf)
64
65         circle1 = Circle.ByCenterPointRadius(cent1,radi_armadura)
66         circle2 = Circle.ByCenterPointRadius(cent2,radi_armadura)
67
68         llista_cares_sup.append(circle1)
69
70         l1=Solid.ByLoft([circle1,circle2])
71         l2=Solid.ByLoft([llista_cares_sup[i-1],circle2])
72
73         o = Point.ByCoordinates(0,0,0)
74         v = Vector.ByCoordinates(0,0,1)
75         step = 360/num_armadures
76         angle = range(rotacio_nord,rotacio_nord+360,step)
77
78         for a in angle:
79             armadura = Geometry.Rotate(l1,o,v,a)
80             llista_armadures_tronc.append(armadura)
81
82             ensolapament = Geometry.Rotate(l2,o,v,a)
83
84             llista_ensolapaments.append(ensolapament)
85
86 armadures_actives = Solid.ByUnion(llista_armadures_tronc+llista_ensolapaments)
87
88 OUT = llista_armadures_tronc,llista_ensolapaments

```

Figura 65. Codi per modelar l'armat actiu.

Tal com s'ha introduït anteriorment, aquestes armadures formades per tendons no consten de les barres corrugades d'armadura estructural plantejades al Revit. A més, els diàmetres d'aquestes armadures són fins a un ordre de magnitud superior als diàmetres de l'armat passiu, i el software no permet l'ús d'armadures amb diàmetres d'aquestes dimensions. Per aquesta raó, primerament s'ha plantejat la creació d'una família mitjançant la metodologia emprada per la modelització paramètrica del WindCrete. No obstant, després de dur a terme la generació de la geometria al Dynamo amb la subseqüent visualització de línies blaves no editables al Revit, les famílies creades contenen errors de visualització. Encara que la geometria estigui creada correctament, únicament el traspàs a una família mitjançant **FamilyType.ByGeometry** genera l'error que es visualitza a la següent Figura 66. Es conclou que aquest error intern del software és degut al gran nombre d'elements de l'armat actiu que intersequen per donar continuïtat a l'estructura.

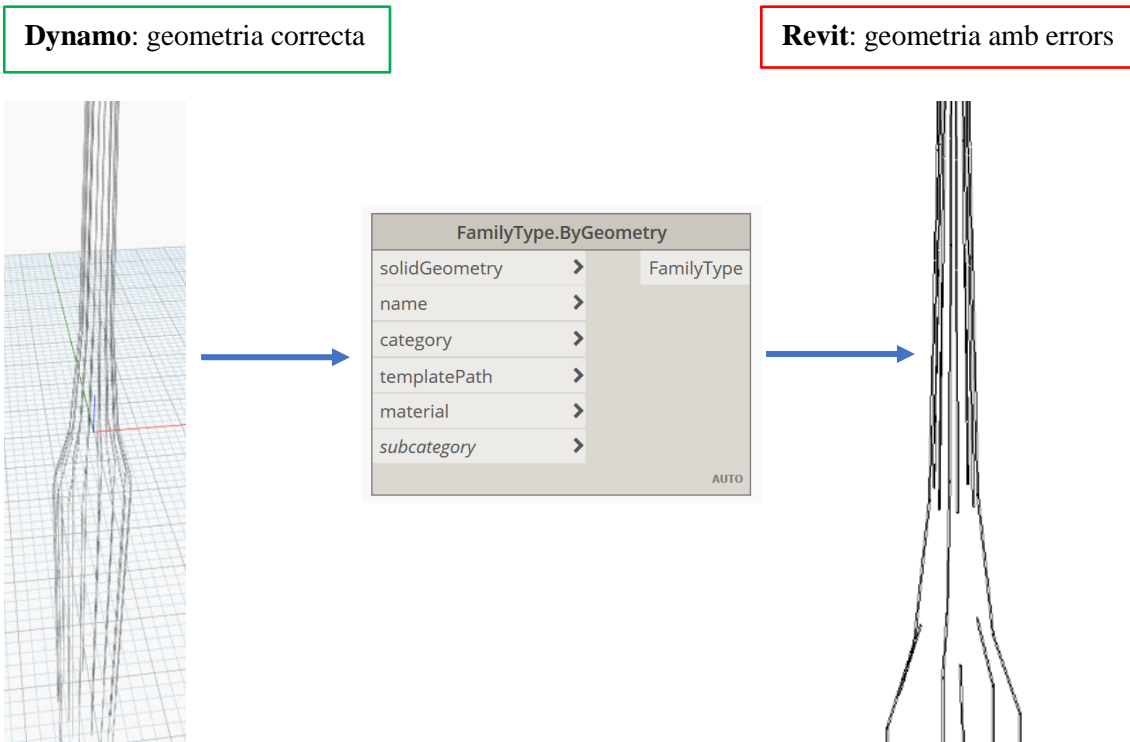


Figura 66. Error en el trasllat de la geometria entre softwares.

D'aquesta manera, s'ha emprat **ImportInstance.ByGeometries** per dur a terme el trasllat de la geometria entre softwares. Aquesta eina permet simplement la representació gràfica de l'armat actiu com a bloc sense tenir la possibilitat d'assignar informació o la categoria de tendó estructural.

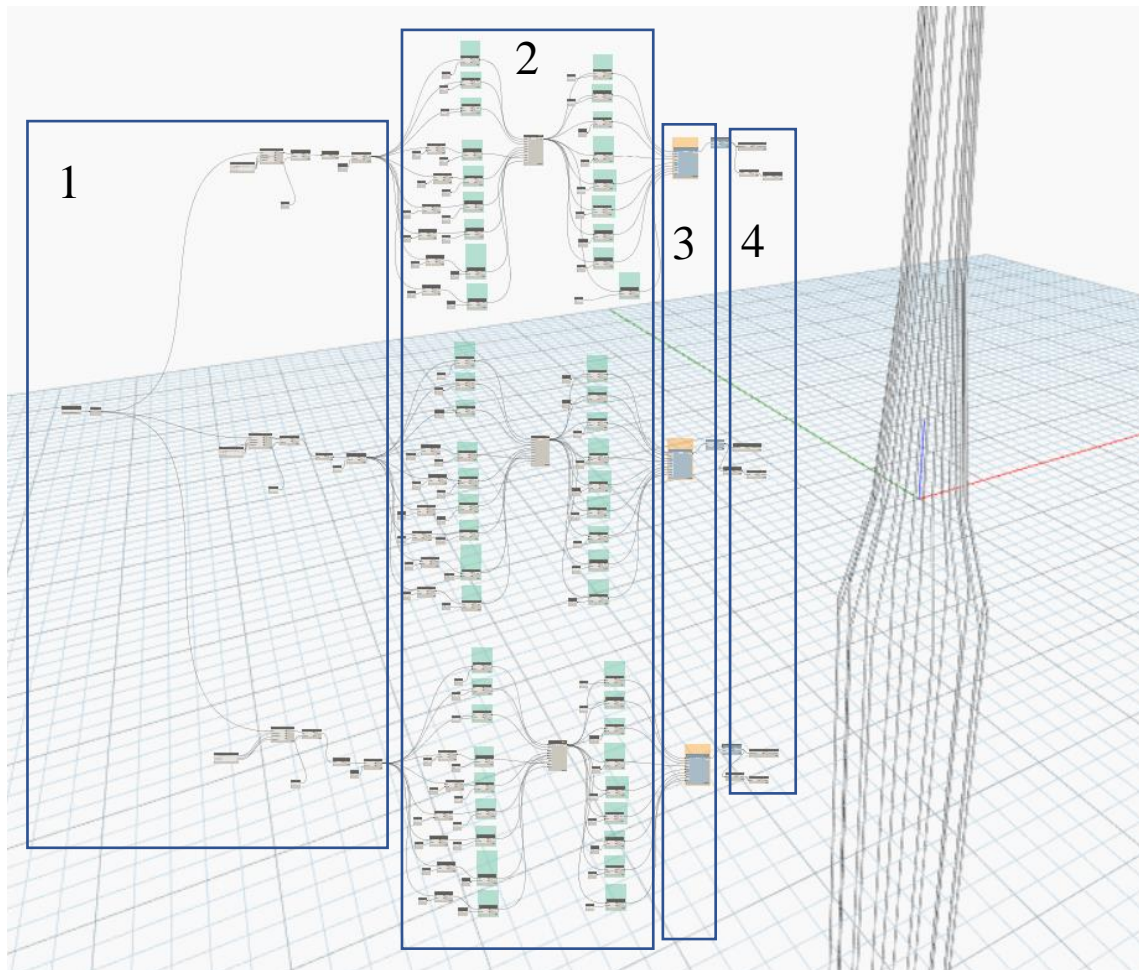


Figura 67. Codi de programació visual per modelar les armadures actives.

1. **Obtenció de les variables d'entrada** mitjançant les dades de l'Excel i filtratge;
2. **Separació** de les variables d'entrada amb el node de **GetItemAtIndex**;
3. **Generació** de les armadures actives mitjançant el codi Python descrit anteriorment;
4. **Càlcul** del nombre de tendons per dur a terme els amidaments.

5.5 ESTRUCTURES SECUNDÀRIES

Les plataformes per aerogeneradors marins compten amb estructures secundàries que permeten l'accés per dur a terme tasques de manteniment. Els elements principals que conformen aquestes estructures consten d'una plataforma d'accés, de les escales exteriors i interiors i de les plataformes tipus Tramex que se situen dins de l'aerogenerador. En aquest apartat es generen aquests elements pel WindCrete 2MW i alhora s'ha creat una família de turbina eòlica.

El disseny de tots aquests elements s'ha basat en les normatives europees UNE-EN 50308:2005 [73], que tracta dels requisits pel disseny d'aerogeneradors, i UNE-EN ISO 14122-4:2017 [74], pel disseny de les escales de gat fixes.

5.5.1 PLATAFORMA D'ACCÉS

Per accedir a l'interior de l'aerogenerador marí hi ha una porta d'entrada a la torre situada a la plataforma d'accés. Aquesta plataforma es localitza a les proximitats del nivell del mar però a una distància suficient per garantir-ne la seguretat. Per arribar a la plataforma d'accés mitjançant embarcacions de manteniment (o *Service Operation Vessels*) es poden emprar les escales externes o posicionar passarel·les provisionals (o *Walk 2 Work (W2W) Vessel with dynamic gangway*).

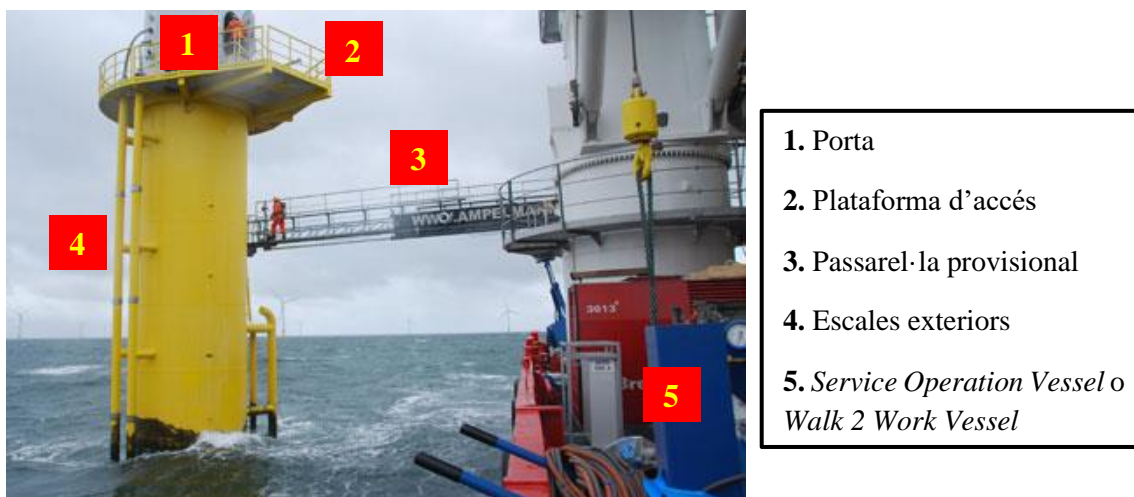


Figura 68. Accés a la plataforma eòlica flotant [75].

La plataforma d'accés ha de comptar amb una àrea de 16 m² per l'accés mitjançant embarcacions de manteniment i per posicionar provisionalment equipaments (aquesta àrea permet ubicar un palet europeu d'una tona de capacitat). Per traslladar maquinària a la torre s'usa una grua amb una capacitat de càrrega de 3.000 kg ubicada a un extrem de la plataforma. Finalment, les dimensions de l'estructura han de permetre la circulació còmode de treballadors i maquinària amb una amplada de 1,2 – 1,5 metres. Per generar l'estructura s'han seguit les recomanacions de MHI Vestas (Figura 69) i s'ha realitzat una família paramètrica de Revit (Figures 70 i 71).



Figura 69. Dimensions de la plataforma d'accés [76].

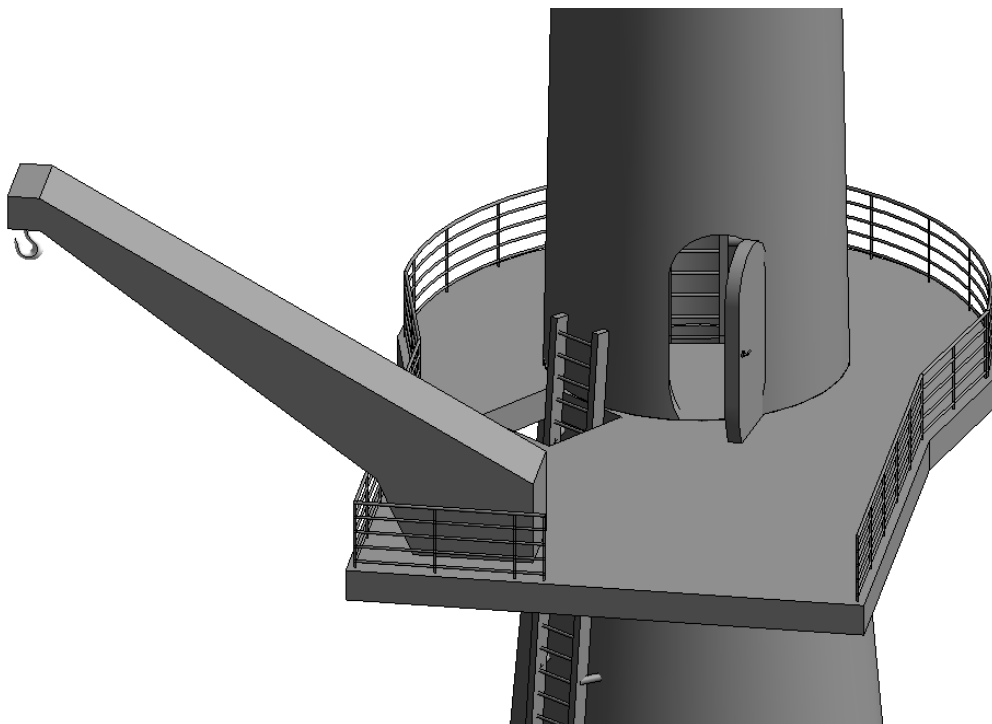


Figura 70. Família paramètrica Revit amb les dimensions pertinents.

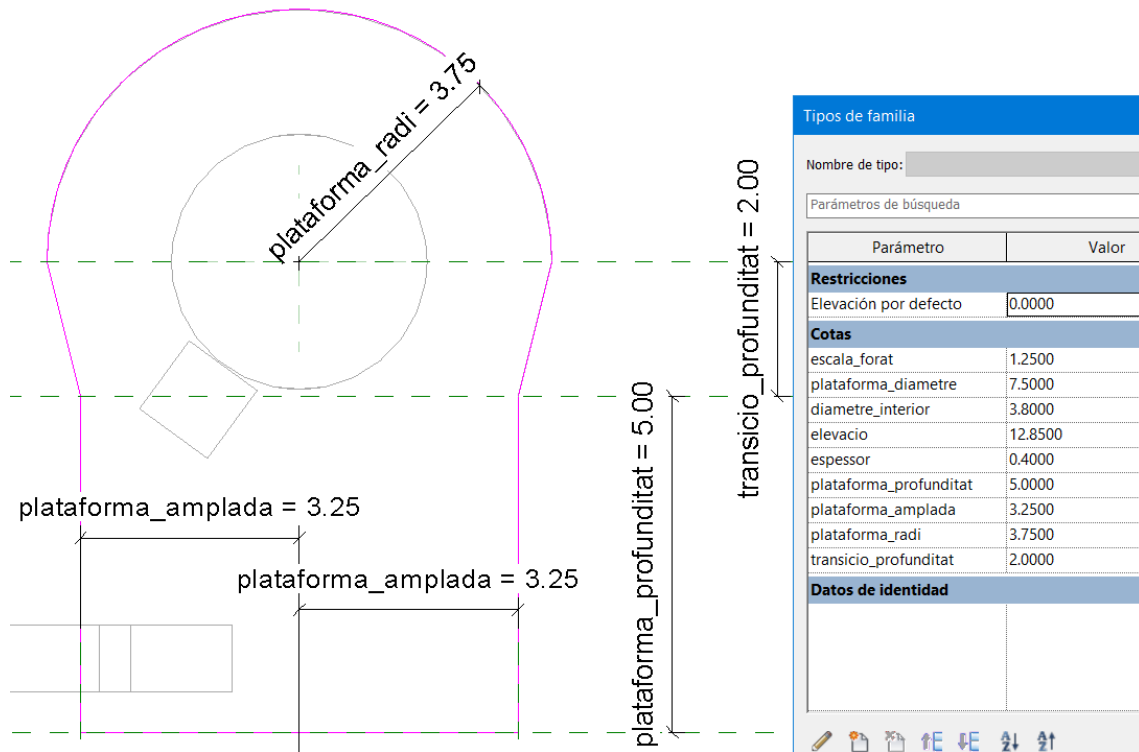


Figura 71. Parametrizació de la família Revit de la plataforma d'accés.

5.5.2 ESCALES

La posició de la plataforma està condicionada per les metodologies d'accés i per les condicions de l'onatge que repercuteixen en el disseny de les escales exteriors. Bàsicament, s'ha de comptar amb una escala "mullada" que dependrà de les característiques de l'onatge, i una escala "seca" de 6 metres d'alçada, que s'uneixen en una plataforma de descans. L'escala que es troba en contacte amb el mar ha de comptar amb 1 metre inferior a la marea astronòmica més baixa (o Lowest Astronomical Tide, LAT) i 8 metres sobre de la marea astronòmica més alta (o Highest Astronomical Tide, HAT).

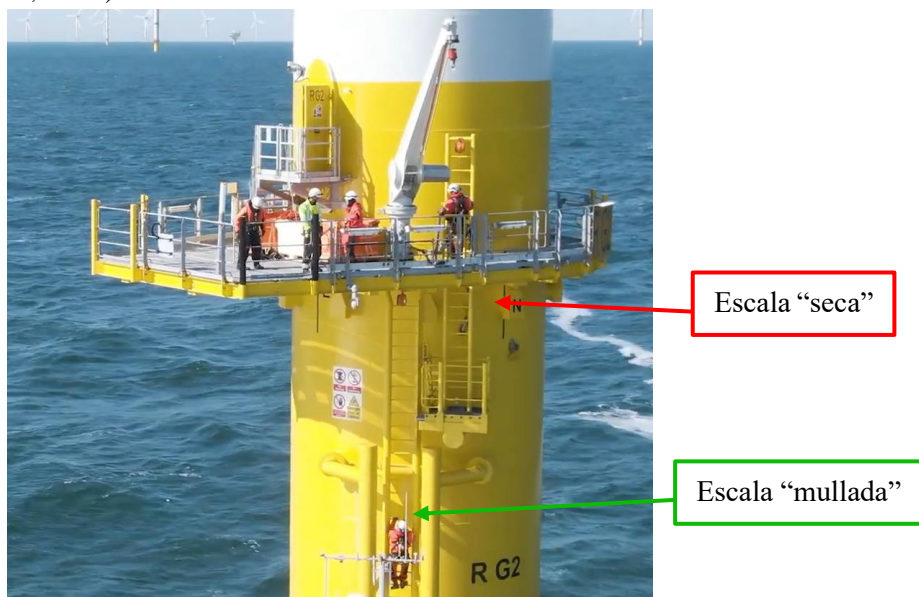


Figura 72. Característiques de les escales situades a l'exterior de la plataforma [75].

D'acord amb la normativa d'escaleres fixes, les característiques que s'han optat en el disseny han estat: amplada de l'esgraó de 60 cm, distància entre esgraons de 30 cm, distància de prolongació al tram final d'1 m i plataformes de descans cada 9 metres.

Per modelitzar les escaleres al Revit, s'ha creat una família genèrica amb l'eina d'escombrada⁵ pels diferents elements que conformen l'escala. Una vegada s'ha creat una unitat d'esgraó, la resta s'han generat amb una matriu lineal, que consta de la repetició d'un element segons el nombre total d'elements desitjats i la distància entre aquests. Sense haver dut a terme un disseny estrictament paramètric es pot definir la geometria de l'escala i dels esgraons -amb el perfil i la longitud del camí d'escombrada-, i el nombre d'esgraons -amb la matriu lineal- (Figura 73).

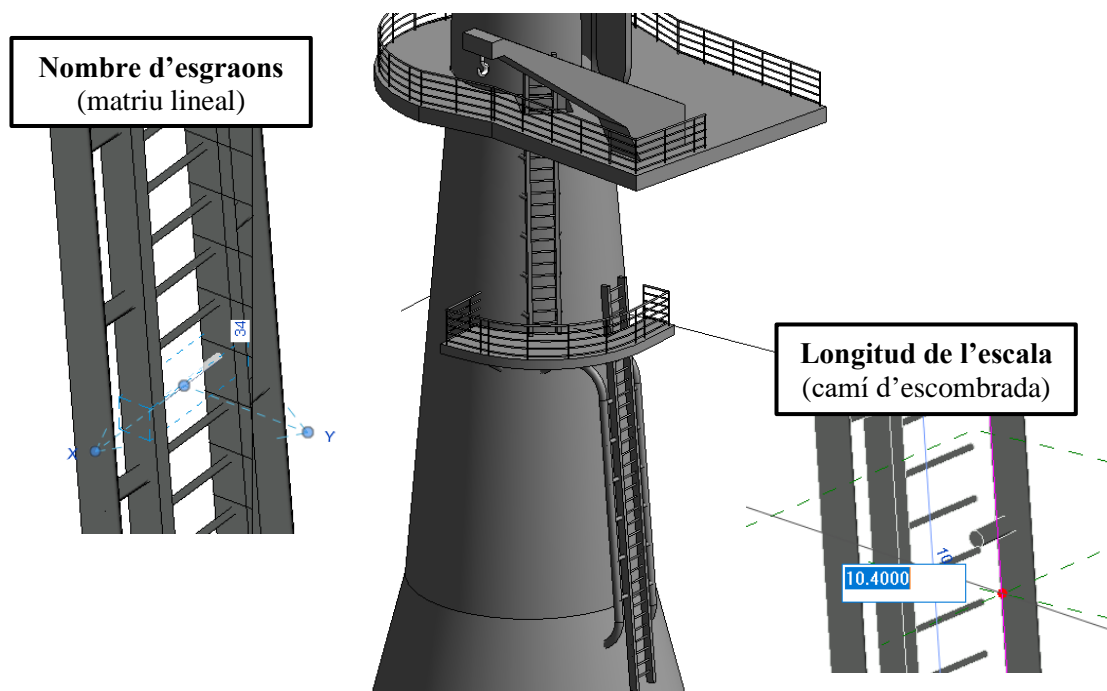


Figura 73. Escaleres externes modelitzades en una família Revit.

A més, les escaleres internes (Figura 75) s'ha proporcionat una protecció circumdant en forma de cercles i plataformes de descans cada 9 metres. A falta d'un element estructural en forma de Tramex, s'han modelitzat aquestes plataformes com a lloses de formigó encastades (Figura 74).

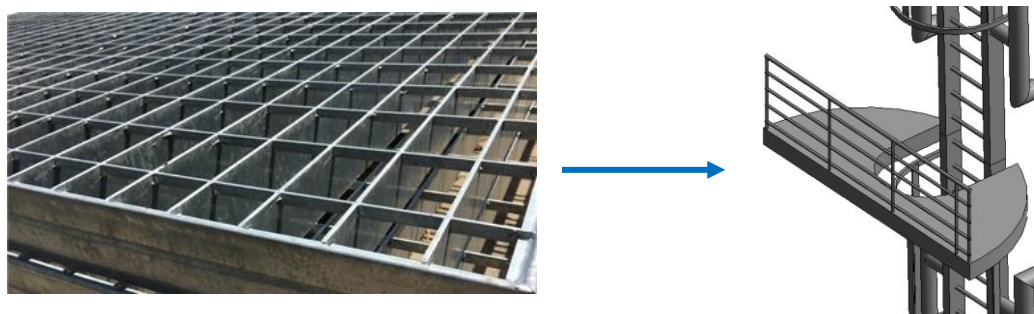


Figura 74. Plataformes de descans a les escaleres internes del WindCrete.

⁵ **Escombrada:** formació de la geometria sòlida amb una secció transversal al llarg d'un camí determinat.

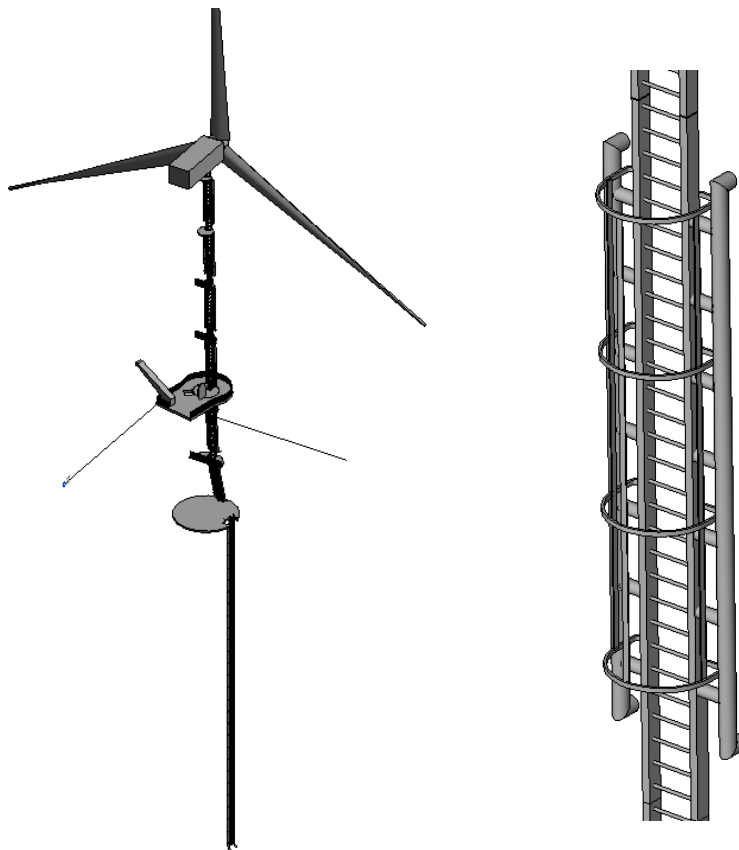


Figura 75. Escalles interiors del WindCrete i plataformes de descans.

5.5.3 TURBINA

La turbina no és una estructura secundària d'un aerogenerador marí ja que és l'element que permet la generació d'energia elèctrica a partir del recurs eòlic. No obstant, en l'àmbit d'aquest projecte, com que la turbina no tracta d'un objectiu del present estudi, sí que es considera com una estructura complementària a la plataforma WindCrete generada paramètricament. Tal com s'ha esmentat, el model objecte a la modelització de les estructures secundàries empra una turbina eòlica de 2 MW de potència. D'aquesta forma s'han considerat les dimensions d'una trubina Vestas V-80 2 MW amb un diàmetre del rotor de 80 metres [77].

La caixa (o *hub*) consta d'un sòlid de revolució per formar la meitat d'un el·lipsoide on s'uniran les tres pales de la turbina. Les pales s'han modelitzat mitjançant l'eina de fusió d'escombrada, definint el perfil més pròxim a la caixa com dues el·lipses i el perfil exterior com una circumferència. En la intersecció entre les pales i la caixa s'ha creat uns elements de transició per unir ambdós elements. A falta d'informació sobre el fabricant de la turbina, s'ha generat la gòndola (o *nacelle*) mitjançant una extrusió d'un rectangle. Tots els elements descrits s'il·lustren a la següent Figura 76.

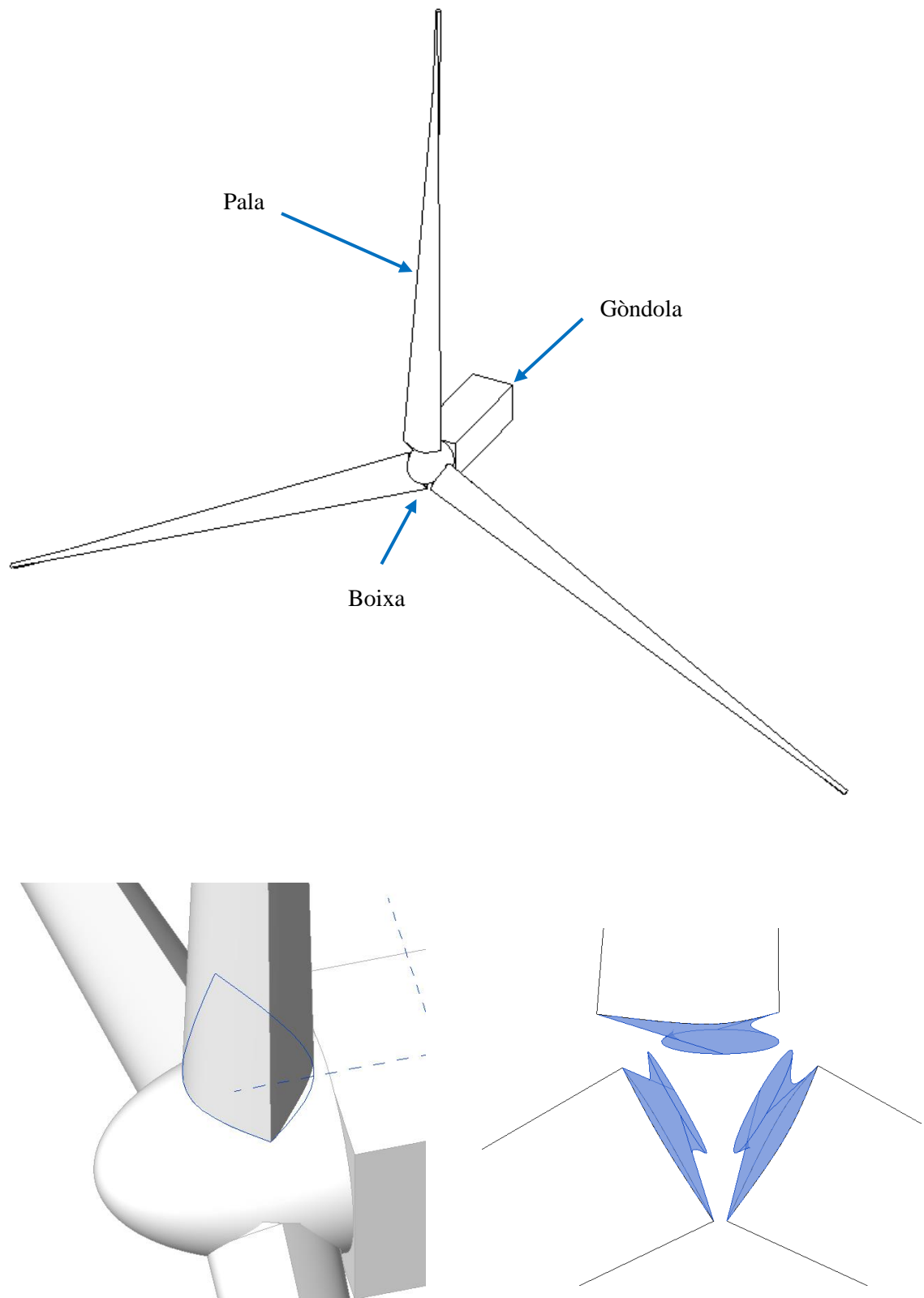


Figura 76. Família de la turbina i detalls dels elements.

6. RESULTATS: REPRESENTACIÓ GRÀFICA I CLASH DETECTION (BIM 3D)

6.1 PLÀNOLS I SECCIONS

L'eina digital de la metodologia BIM emprada en aquest projecte -Autodesk Revit-, permet la representació dels elements constructius de forma bidimensional i tridimensional. Aquest fet ofereix un valor afegit respecte de les seccions en dues dimensions conformades amb línies CAD. La visualització de vistes a l'espai mitjançant les eines BIM ajuda a la interpretació dels plànols i a reduir errors, optimitzant els processos i reduint el cost en totes les etapes dels projectes.

En el present apartat, s'han il·lustrat visualment les diferents vistes, plànols i seccions realitzades del WindCrete 2 MW modelitzat paramètricament amb els codis Python. Tal com s'observa a la següent Figura 77, s'han representat cinc seccions. Les primeres les tres seccions consten dels punts més crítics de l'estructura perquè tracten de les transicions entre armadures amb solapaments i canvis de geometria. Per aquesta raó, tal com s'observa a les pròximes pàgines 73, 74 i 75, s'han proporcionat seccions transversals 2D i detalls 3D. Les dues seccions restants, representades a la pàgina 76, consten de les vistes clàssiques bidimensionals ja que no presenten canvis significatius de geometria.

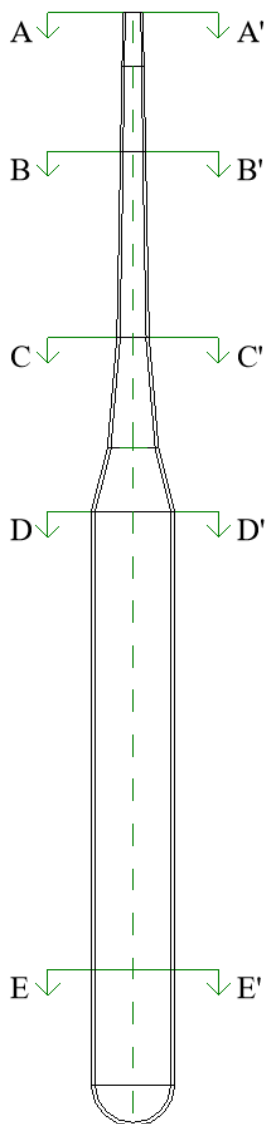
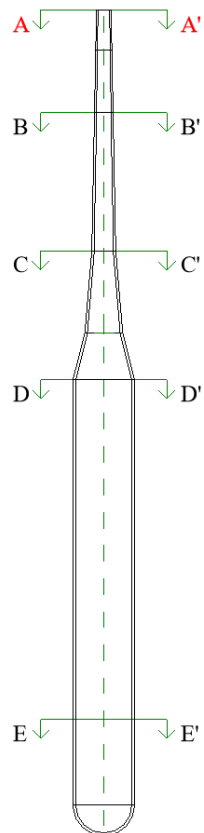
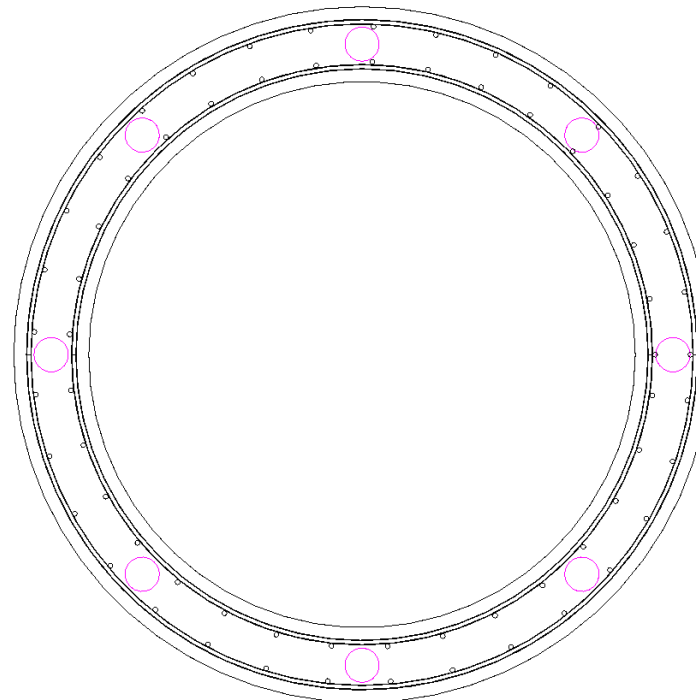


Figura 77. Seccions transversals plantejades al WindCrete 2 MW.



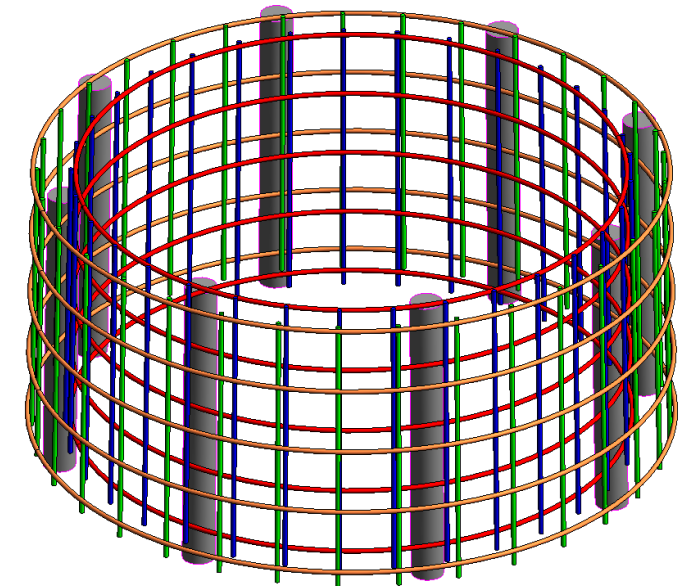
Secció A-A'

E=1:25



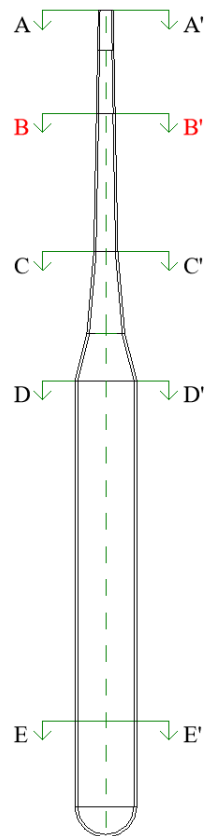
Detall 3D

Armatures passives i actives



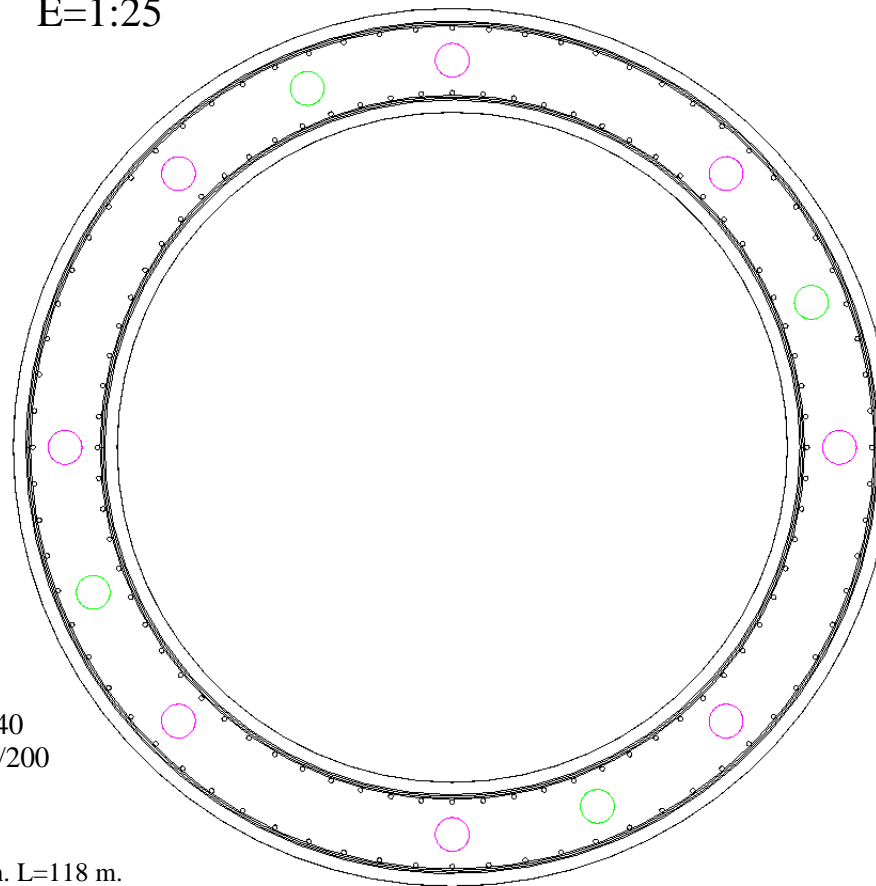
- Recobriment:** 50 mm
- Diàmetre extern:** 2,32 m
- Espessor formigó:** 0,25 m
- Barres longitudinals rectes:** $\phi 16/240$
- Barres transversals circulars:** $\phi 16/240$

○ Conjunt 1: 24 cordons. D=115 mm. L=118 m.




Secció B-B'

E=1:25



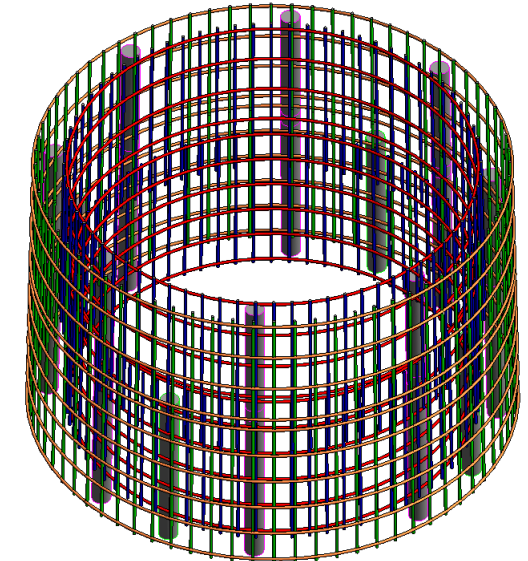
Recobriment: 50 mm
Diàmetre extern: 2,95 m
Espessor formigó: 0,35 m
Barres longitudinals rectes: $\phi 16/240$
Barres transversals circulars: $\phi 16/200$

 Conjunt 1: 24 cordons. D=115 mm. L=118 m.

 Conjunt 2: 20 cordons. D=115 mm. L=115 m.

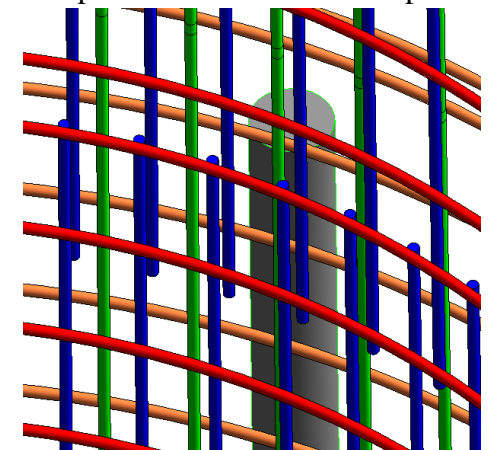
Detall 3D

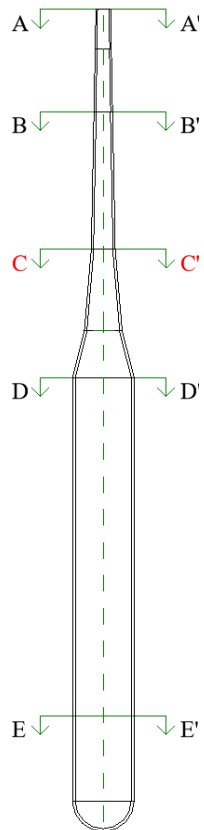
Armadures passives i actives:
transició entre seccions (B-B')



Detall 3D

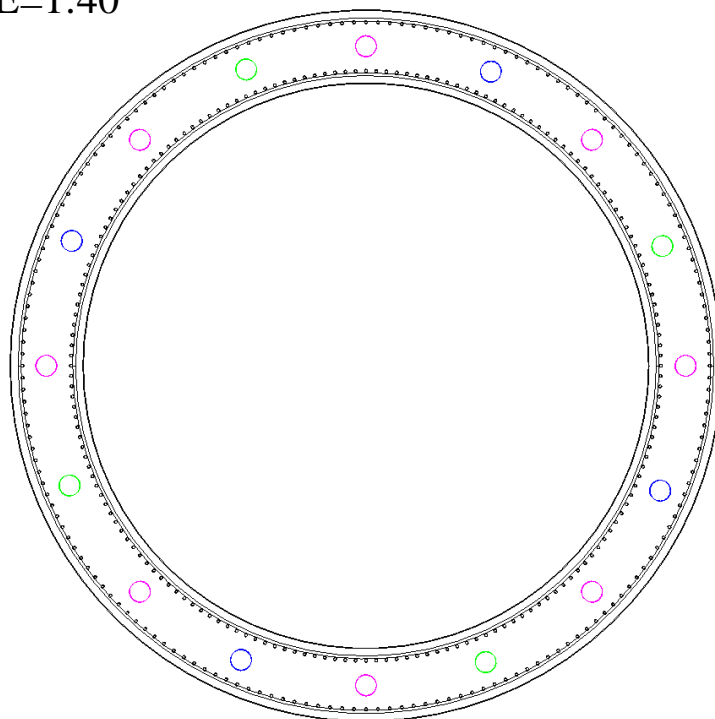
Solapaments entre armadures passives





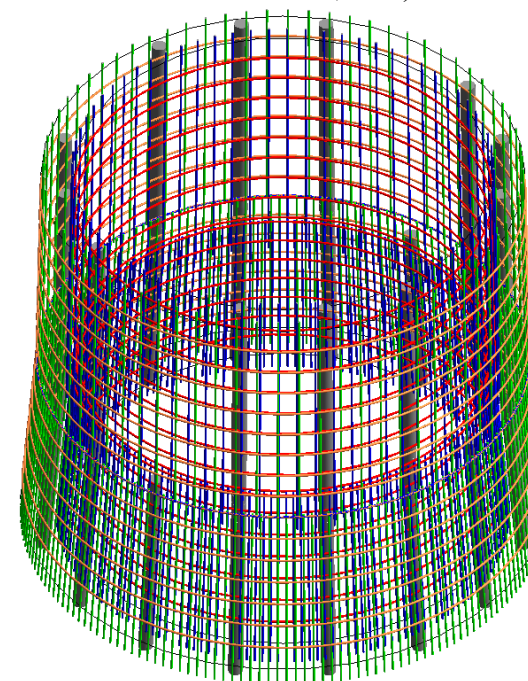
Secció C-C'

E=1:40



Detall 3D

Armatures passives i actives:
transició entre seccions (C-C')

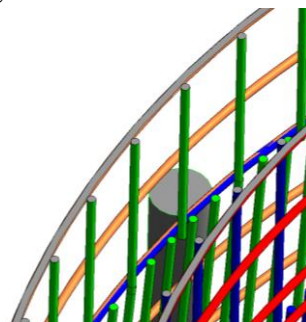


Recobriment: 50 mm
Diàmetre extern: 3,8 m
Espessor formigó: 0,40 m
Barres longitudinals rectes: $\phi 16/240$
Barres transversals circulars: $\phi 16/200$

- Conjunt 1: 24 cordons. D=115 mm. L=118 m.
- Conjunt 2: 20 cordons. D=115 mm. L=115 m.
- Conjunt 3: 20 cordons. D=115 mm. L=93 m.

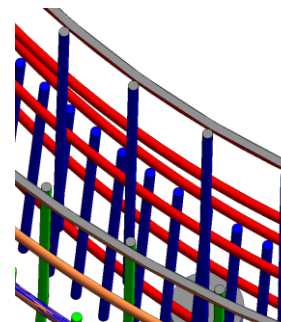
Detall 3D

Transició armatures passives longitudinals externes



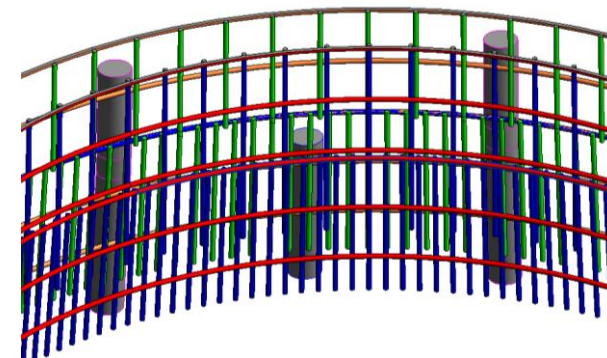
Detall 3D

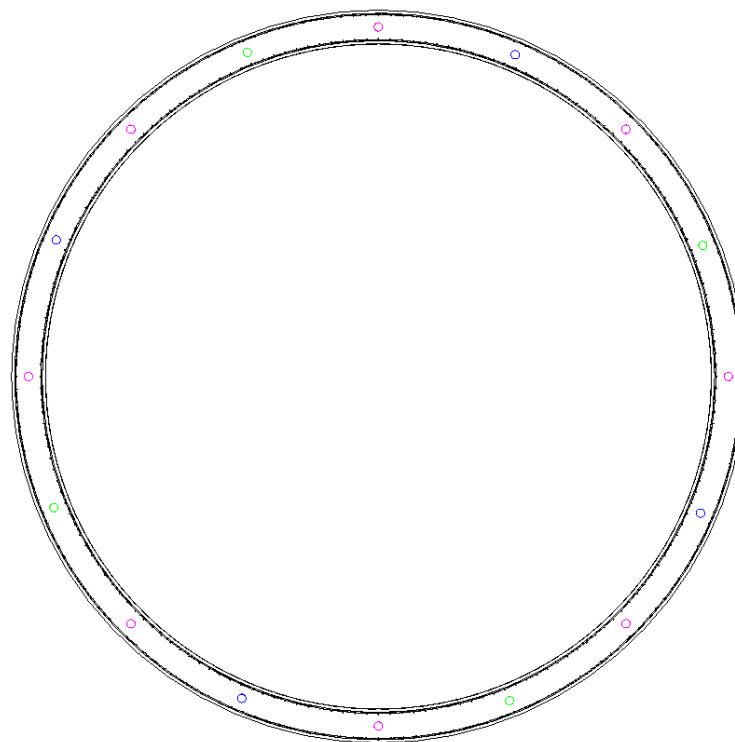
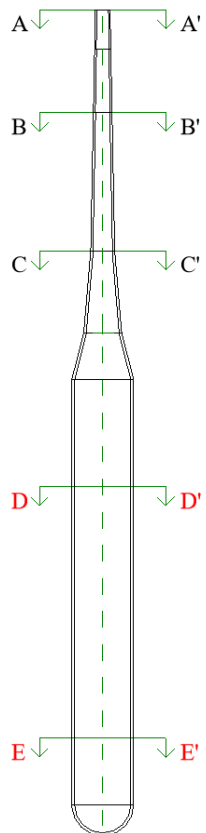
Transició armatures passives longitudinals internes



Detall 3D

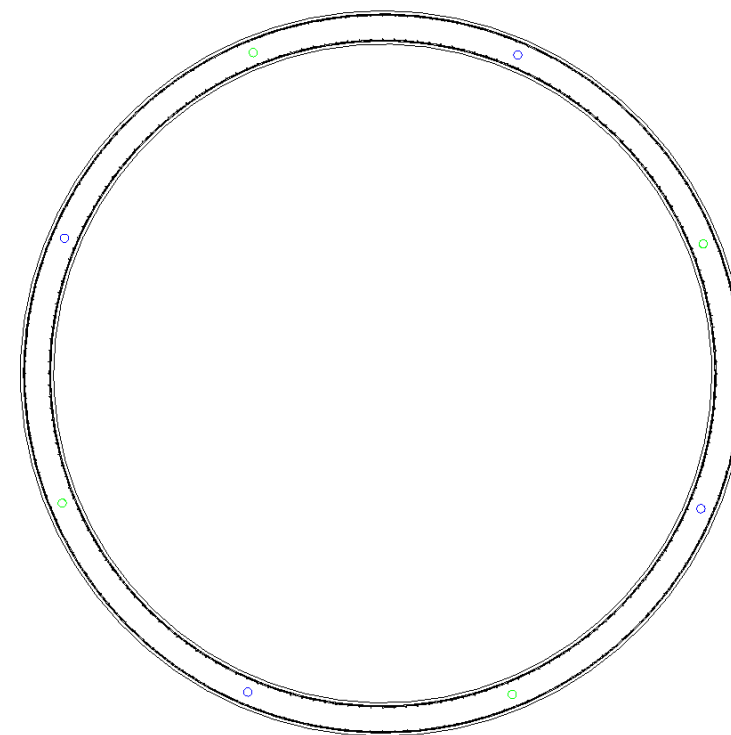
Transició entre armatures actives





Secció D-D'

E=1:100





Secció E-E'

E=1:100

Recobriment: 50 mm
Diàmetre extern: 9,8 m
Espessor formigó: 0,45 m
Barres longitudinals rectes: $\phi 16/240$
Barres transversals circulars: $\phi 16/200$

 Conjunt 1: 24 cordons. D=115 mm. L=118 m.

 Conjunt 2: 20 cordons. D=115 mm. L=115 m.

 Conjunt 3: 20 cordons. D=115 mm. L=93 m.

6.2 CLASH DETECTION

En la part teòrica d'aquest projecte ja s'han introduït els conceptes bàsics d'una de les eines més importants en la metodologia BIM: el *clash detection*. Resumidament, tracta de dur a terme una anàlisi de col·lisions o interseccions entre tots els elements del model BIM per detectar errors constructius. D'aquesta forma es poden evitar conflictes amb antelació i s'ofereix una major eficàcia del projecte que proporciona menys despeses relatives a demores, modificacions en obra i errors constructius. El gran avantatge de la metodologia BIM és que una vegada s'han corregit les interferències pertinents il·lustrades en el clash detection, aquestes modificacions fan variar les subseqüents anàlisis de la planificació temporal, cost, sostenibilitat i gestió del projecte.

En aquest projecte s'ha dut a terme un clash detection entre el model WindCrete 2 MW amb les armadures passives i actives i el model WindCrete 2 MW amb les estructures secundàries (Figura 78). Al tractar-se d'un treball acadèmic, només s'han analitzat els punts de conflicte i interferències del model, a falta de més informació sobre les juntes entre les plataformes d'accés i el WindCrete, sobre les verificacions estructurals a la secció de la porta i sobre l'ancoratge entre els diferents elements -plataformes internes, escales i parets de l'estructura de formigó-.

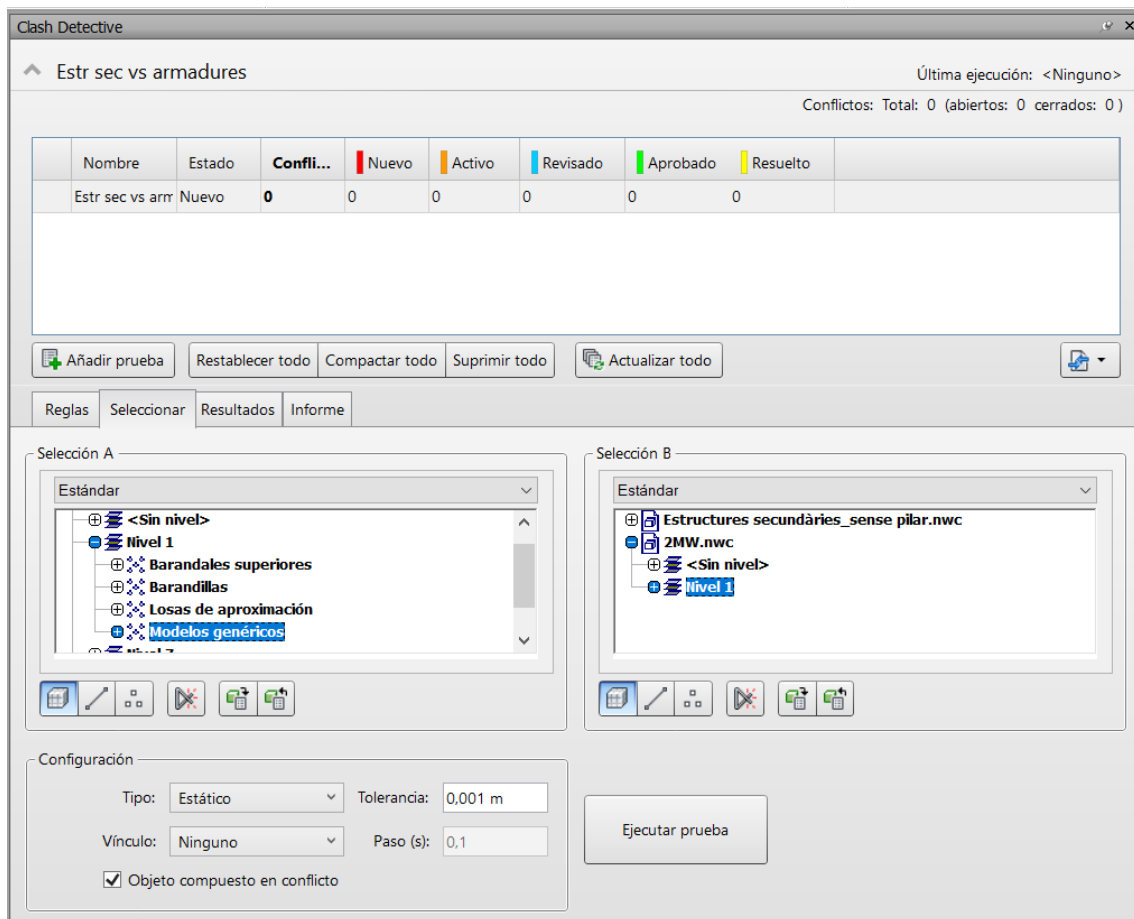


Figura 78. Models pel clash detection: WindCrete armat (esquerra) i estructures secundàries (dreta).

Aquesta anàlisi es pot realitzar amb el software emprat en el transcurs d'aquest treball -Autodesk Revit- o es pot emprar un software semblant però especialitzat en la visualització de models BIM -Autodesk Navisworks-. Per comparar els resultats obtinguts, s'han utilitzat ambdós programaris obtenint els mateixos punts de conflicte. A les següents Figures 79 i 80, es mostren els resultats obtinguts amb el programari de Navisworks ja que és l'eina especialitzada en aquest àmbit.

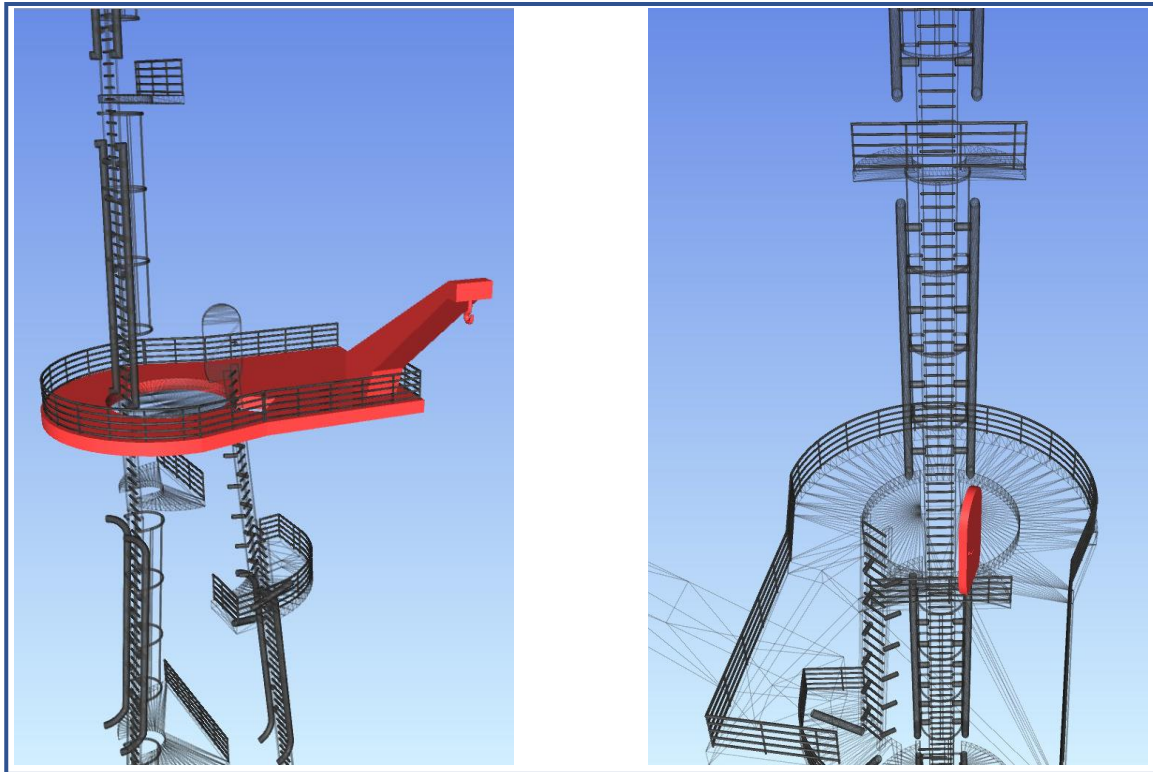


Figura 79. Intersecció del WindCrete amb la plataforma d'accés (esquerra) i col·lisió del WindCrete amb la porta (dreta).

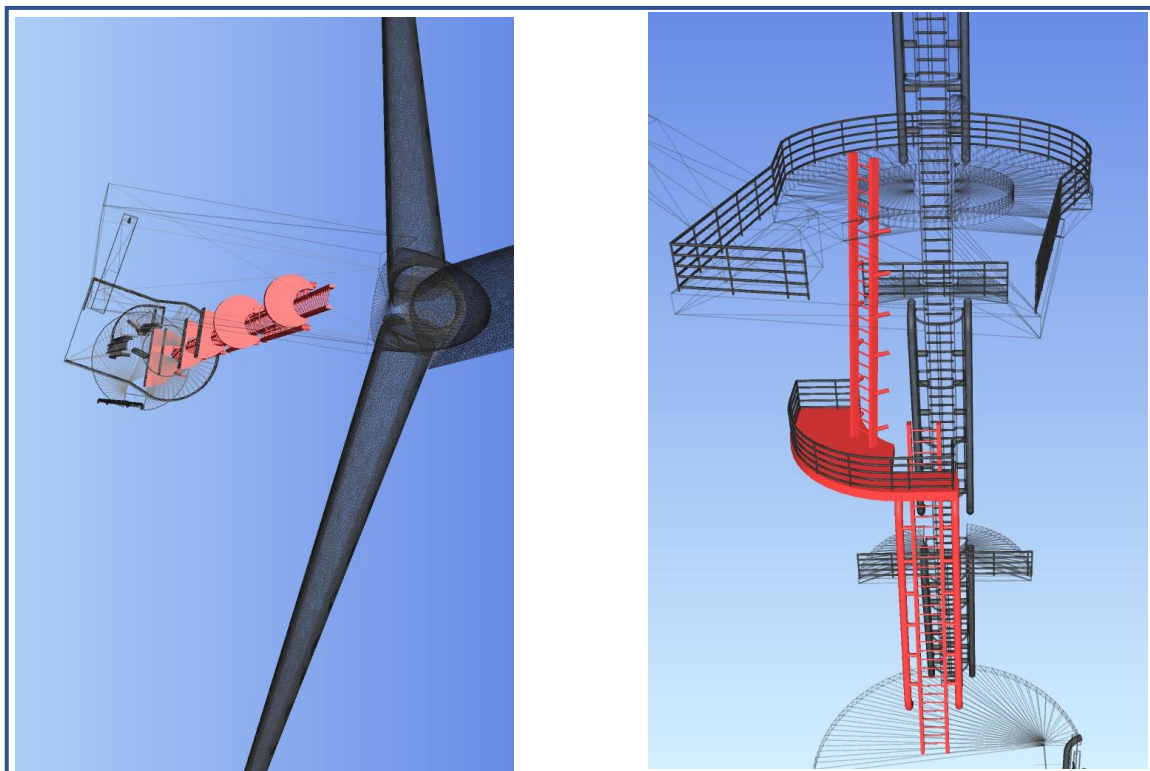


Figura 80. Interferència del WindCrete amb les escales internes (esquerra) i externes (dreta).

Amb el clash detection s'obtenen les següents interseccions (Figures 81 i 82):

- **Plataforma d'accés i WindCrete amb armadures (interferència n°2):** falta definir la unió entre elements.
- **Porta i armadures (interferència n°3):** falta definir com es dimensiona l'obertura del WindCrete i les armadures en aquest punt.
- **Plataformes interiors i WindCrete amb armadures (interferència n°5):** falta definir la unió de les plataformes interiors a les parets del WindCrete per no afectar a l'armat amb recobriment 50 mm.
- **Escales i WindCrete amb armadures (interferències n°1, 4 i 5):** falta definir la unió de les escales a les parets del WindCrete per no afectar a l'armat amb recobriment 50 mm.

Informe de interferencias

Archivo de proyecto de informe de interferencias: C:\Users\user\Documents\UNIVERSITAT\4rt\Treball Final de Grau\REVIT\Estructures secundàries
 Creación: lunes, 25 de julio de 2022 17:49:06
 Última actualización:

	A	B
1	Modelos genéricos : escales_1_fora : escales_1_fora : ID 181604	Armadures totals.rvt : Pilares estructurales : 2MW_cu : 2MW_cu : ID 330335
2	Modelos genéricos : plataforma_2MW : plataforma_2MW : ID 199382	Armadures totals.rvt : Pilares estructurales : 2MW_cu : 2MW_cu : ID 330335
3	Modelos genéricos : porta_ovalada : porta_ovalada : ID 236341	Armadures totals.rvt : Pilares estructurales : 2MW_cu : 2MW_cu : ID 330335
4	Modelos genéricos : escales_cilindre : escales_cilindre : ID 495097	Armadures totals.rvt : Pilares estructurales : 2MW_cu : 2MW_cu : ID 330335
5	Modelos genéricos : escales interiores : escales interiores : ID 571645	Armadures totals.rvt : Pilares estructurales : 2MW_cu : 2MW_cu : ID 330335

Fin de informe de interferencias

Figura 81. Informe d'interferències entre ambdós models amb Revit.

The screenshot shows the 'Clash Detective' window with the following data table:

Nombre	Estado	Confli...	Nuevo	Activo	Revisado	Aprobado	Resuelto
Estr sec vs arm	Terminado	5	5	0	0	0	0

Nombre	Estado	Encontrado	Aprobado...	Aprobado	Descripción	Asignado a	Distancia
● Conflicto1	Nuevo	16:43:44 26-07-2022			Estático		-0,184 m
● Conflicto2	Nuevo	16:43:44 26-07-2022			Estático		-0,127 m
● Conflicto3	Nuevo	16:43:44 26-07-2022			Estático		-0,115 m
● Conflicto4	Nuevo	16:43:44 26-07-2022			Estático		-0,103 m
● Conflicto5	Nuevo	16:43:44 26-07-2022			Estático		-0,014 m

Figura 82. Interferències entre ambdós models amb Navisworks.

6.3 RENDERITZACIONS

La renderització ha estat l'última eina emprada per representar gràficament el model BIM del WindCrete generat paramètricament. Amb el mateix software d'Autodesk Revit es poden generar diferents vistes per il·lustrar elements constructius de forma més realista. Principalment, la finalitat d'aquestes visualitzacions és generar vistes descriptives -i no constructives- per dur a terme la divulgació del projecte a l'administració pública, als clients o a la ciutadania. En les següents Figures 83, 84, 85, 86 i 87 es mostren les diferents renderitzacions realitzades.

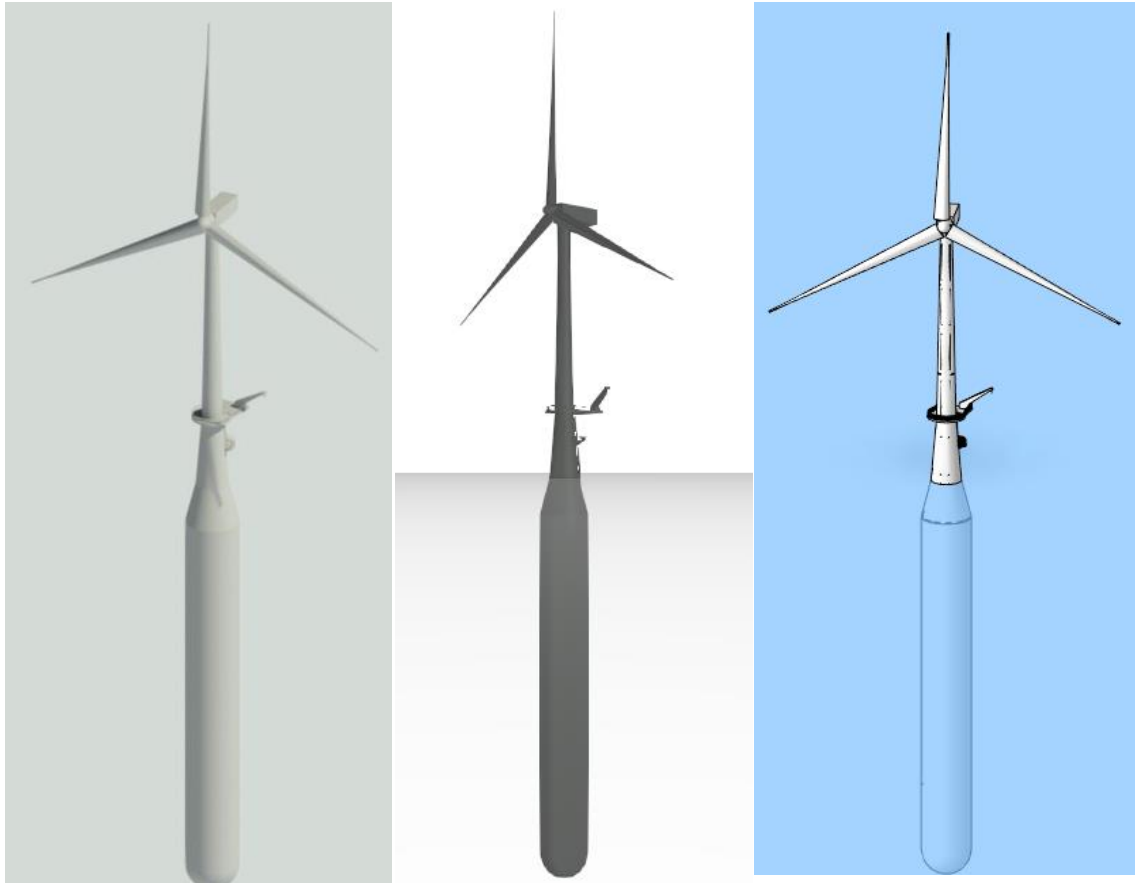


Figura 83. Renderitzacions del WindCrete 2 MW.

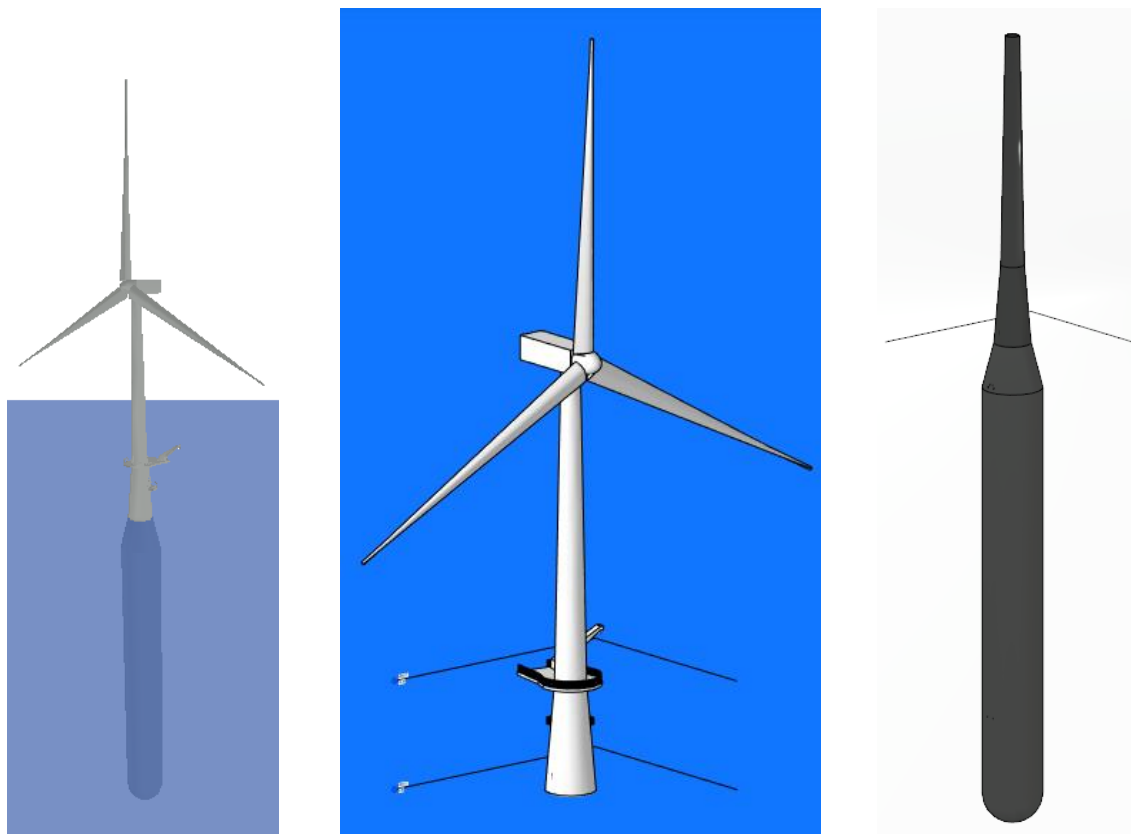


Figura 84. Renderitzacions del WindCrete 2 MW.



Figura 85. Renderitzacions del WindCrete 2MW.



Figura 86. Renderitzacions de les estructures secundàries d'accés.



Figura 87. Renderitzacions de les estructures secundàries d'accés.

7. RESULTATS: COST (BIM 5D)

Una vegada s’han creat els diferents codis que permeten generar paramètricament les plataformes eòliques flotants SPAR tipus WindCrete, s’han modelat les plataformes que suporten diferents tipus turbines (100 kW, 2 MW i 15 MW) per comparar els valors dels amidaments, el cost dels diferents elements que conformen l’estructura i les propietats hidroestàtiques. També s’ha dut a terme el modelatge d’una plataforma de 5 MW emprant diferents materials per comparar aquestes variables segons una plataforma d’acer i una estructura monolítica de formigó armat i pretensat. Per aportar el rigor en present anàlisi, els valors essencials d’amidaments, cost i els respectius centres de gravetat han estat comprovats amb les dades obtingudes per l’equip de recerca del WindCrete de la UPC. Els preus unitaris dels materials s’han extret de l’article on es relaciona l’alternativa en formigó respecte la solució metàl·lica [46] i corresponen al cost intrínsec del material i a la despesa addicional del procés de construcció (requeriments especials de control d’execució pel formigó d’alta resistència, encofrats, col·locació armat, revestiments d’epoxy per les armadures passives, ancoratges pel procés de posttensat, el transport dels materials, etc). Els materials que s’usen en els diferents models es mostren a la següent Taula 2.

	Formigó	Acer passiu	Acer actiu	Llast
Tipus	HP-60/B/20/IIIc-Qc	B500	Y-1860-S7	Escòries d'alts forns
Densitat (kg/m3)	2500	7850	7850	2500
Unitat d'amidament	m ³	kg	kg	t
Cost unitari	150	1,5	3,6	35

Taula 2. Materials del WindCrete.

Per generar les diferents plataformes s’han usat els plànols proporcionats per l’equip de recerca on s’especifiquen les dimensions dels elements estructurals. A continuació simplement s’han indicat les variables d’entrada al codi WindCrete per crear l’estructura i a la fulla d’Excel per generar les armadures (Figura 88), obtenint el model en la seva totalitat (Figura 89).

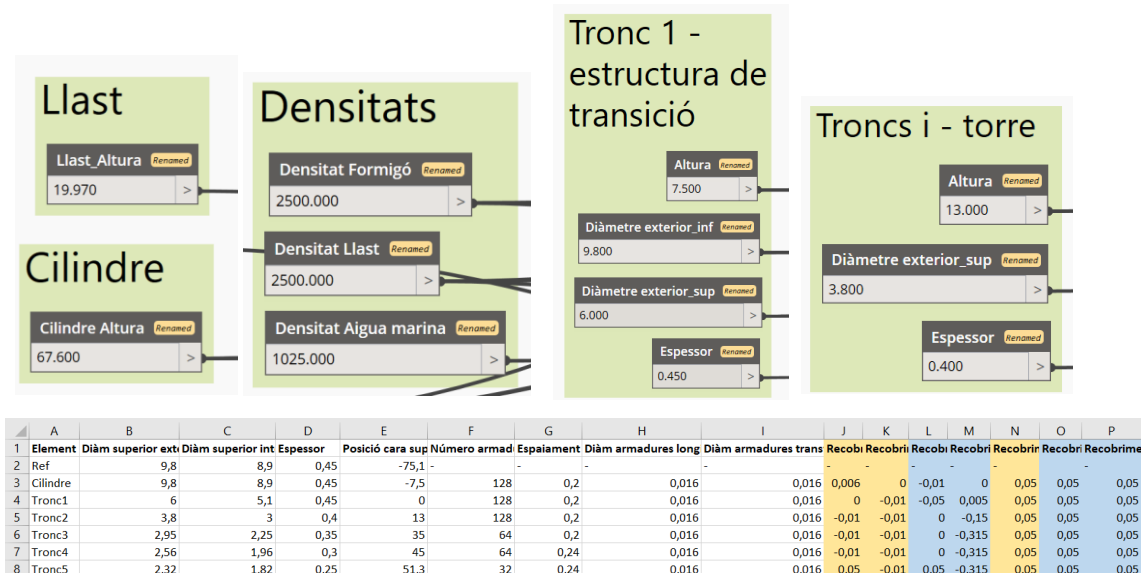


Figura 88. Variables d’entrada que ha de definir l’usuari per generar el WindCrete (part superior) i les armadures (part inferior).

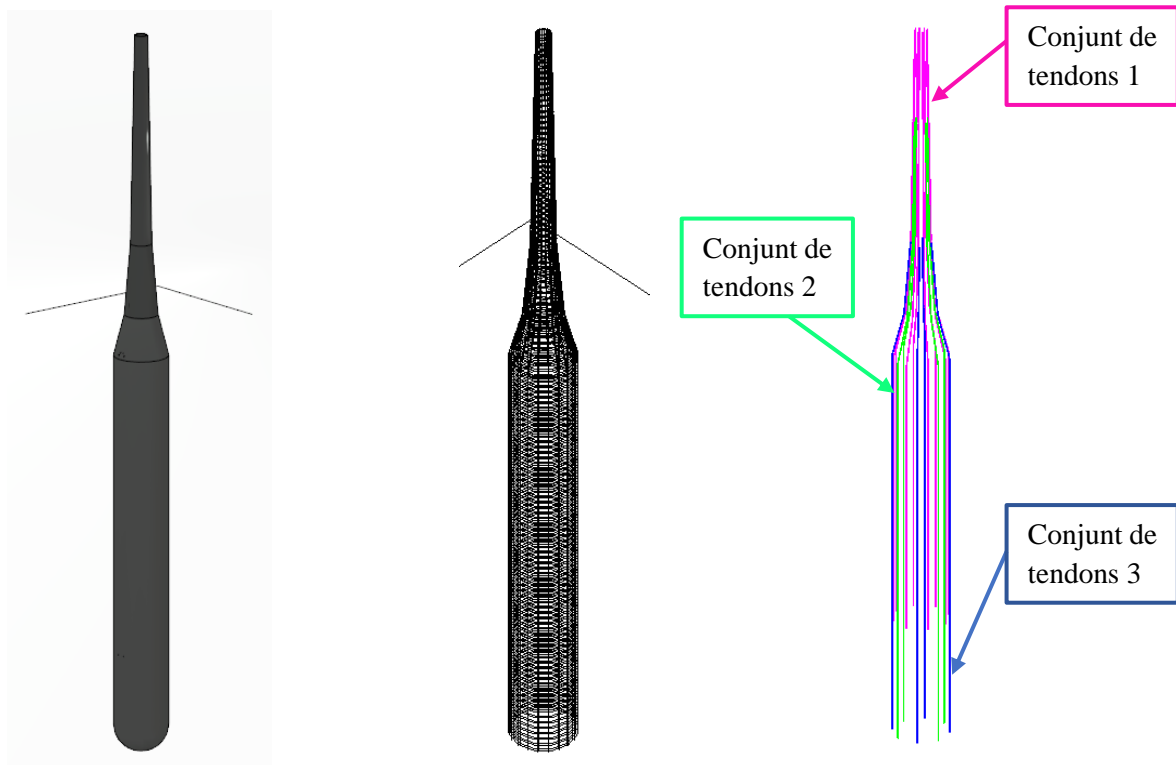


Figura 89. Outputs dels codis -d'esquerra a dreta- estructura de formigó, armat passiu i armat actiu.

7.1 COMPARACIÓ ENTRE ELS DIFERENTS WINDCRETE

Les característiques de la plataforma s'obtenen mitjançant els diferents nodes i codis esmentats al llarg de l'apartat 5. No obstant, per obtenir la informació associada a les armadures es necessita d'un procés més elaborat. Pels amidaments i cost de les armadures passives s'ha emprat una taula de planificació Revit (Taula 3). Aquestes taules s'actualitzen automàticament amb el model i permeten afegir uns paràmetres determinats com diàmetres, longitud d'armat, volumetria, etc. La principal limitació és que el procés per dur a terme càlculs i relacions entre variables o cel·les és bastant tediós. Per aquesta raó, s'exporten aquestes quantitats en format .txt, s'importen les dades a una fulla d'Excel i es defineixen les diverses funcions per aconseguir els valors de la Taula 4.

<Taula planificació armadures passives WindCrete 2 MW>												
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
Forma	Cantidad	Diàmetro	Longitud total de ba	Volumen de refuerzo	Masa armadura	Costo unitario	Cost total	Imagen de forma	Material	Recubrimiento	Fabricante	
00	1434	16 mm	36940075 mm	7427242.68 cm³	58303.86 kg	1.50	87455.78	<Ninguno>	Acer B500	0.50		
67	2488	16 mm	26631546 mm	5354589.95 cm³	42033.53 kg	1.50	63050.30	<Ninguno>	Acer B500	0.50		
Total gene 3922			63571620 mm	12781832.63 cm³	100337.39 kg		150506.08					

<Taula de planificació armadures passives WindCrete 15 MW>											
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
Forma	Cantidad	Diàmetro de barra	Longitud total	Volumen de refuerzo	Masa total	Costo unitario	Costo total	Imagen de forma	Material	Fabricante	
00	4320	20 mm	184424925 m	57938798.97 cm³	454819.57	1.5	682229.36	<Ninguno>	Acer B500 arm		
67	4896	20 mm	102296138 m	32137279.55 cm³	252277.64	1.5	378416.47	<Ninguno>	Acer B500 arm		
Total gen 9216			286721063 m	90076078.52 cm³	707097.22		1060645.82				

Taula 3. Taules de planificació Revit.

Armat passiu: amidaments i cost								
2MW	Quantitat barres	Mat.	Diàm. (mm)	Longitud (mm)	Volum (m ³)	Massa (kg)	Cost ut. (€/kg)	Cost (€)
Longitudinal (barra recta)	1434	Acer B500	16	36.940.075	7.427.242	58.303	1,5	87.455
Transversal (circular)	1244	Acer B500	16	26.631.546	5.354.589	42.033	1,5	63.050
Total	3922	-	-	63.571.620	12.781.832	100.337	-	150.506
15MW	Quantitat barres	Mat.	Diàm. (mm)	Longitud (mm)	Volum (m ³)	Massa (kg)	Cost ut. (€/kg)	Cost (€)
Longitudinal (barra recta)	4320	Acer B500	20	184.424.925	57.938.798	454.819	1,5	682.229
Transversal (circular)	2448	Acer B500	20	102.296.138	32.137.279	252.277	1,5	378.416
Total	9216	-	-	286.721.063	90.076.078	707.097	-	1.060.645

Taula 4. Amidaments i cost de les armadures passives.

Per obtenir els amidaments de les armadures actives s’ha emprat exclusivament un conjunt de relacions bàsiques entre les variables definides en els plànols. S’ha calculat la massa total mitjançant el nombre de tendons, la densitat i el volum dels cilindres (amb els diàmetres i les longituds unitàries). Aleshores, es pot determinar el pressupost relacionat amb aquesta partida únicament mitjançant el preu unitari i les variables d’entrada del codi geomètric, és a dir, s’obtenen els amidaments de la Taula 5 automàticament.

Armat actiu: amidaments i cost								
2MW	Num. tendons	Num. cordons	Àrea cordó (mm ²)	Long. u. (m)	Diàm. (m)	Massa (kg)	Cost ut. (€/kg)	Cost (€)
Conjunt 1	8	24	150	118	0,115	26677	3,6	96.038,78
Conjunt 2	4	20	150	115	0,115	10833	3,6	38.998,80
Conjunt 3	4	20	150	93	0,115	8760	3,6	31.538,16
Total	16	64	-	-	-	46271	-	166.575,74
15MW	Num. tendons	Num. cordons	Àrea cordó (mm ²)	Long. u. (m)	Diàm. (m)	Massa (kg)	Cost ut. (€/kg)	Cost (€)
Conjunt 1	64	15	150	139,5	0,095	157690	3,6	567.686,88
Conjunt 2	16	34	150	108,5	0,137	69500	3,6	250.202,74
Conjunt 3	16	34	150	200	0,137	128112	3,6	461.203,20
Total	96	83	-	-	-	355303	-	1.279.092,82

Taula 5. Amidaments i cost de les armadures actives.

A continuació es mostra la informació extreta dels models creats en l’escenari on es considera exclusivament l’estructura de formigó per dimensionar la quantitat de llast òptima per garantir l’estabilitat hidroestàtica (Taula 6) i l’escenari real amb la totalitat del WindCrete (Taula 7).

Estructura de formigó monolítica			
Model	WindCrete 100 kW	WindCrete 2 MW	WindCrete 15 MW
Tipus formigó	HP-60/B/20/IIIc-Qc	HP-60/B/20/IIIc-Qc	HP-60/B/20/IIIc-Qc
Densitat formigó (kg/m ³)	2500	2500	2500
Cdg (m)	-19,57	-31,61	-45,6
Ixx=Iyy (m ⁴)	8,34E+04	2,36E+09	4,08E+10
Izz (m ⁴)	3,48E+02	2,23E+07	3,85E+08

Taula 6. Informació de les estructures monolítiques de formigó.

Estructura de formigó pretensat, armat i amb llast			
Model	WindCrete 100 kW	WindCrete 2 MW	WindCrete 15 MW
Altura llast útil (m)	7,18	19,97	44,14
Cdg (m)	-25,68	-49,72	-99,54
Cdf (m)	-22,63	-40,33	-77,18
Empenta (kN)	4535,61	57517,64	407853,01
Volum formigó (m ³)	131,66	1215,05	5848,85
Massa llast (t)	132,04	2875	25063
Massa armat passiu (kg)	-	100337,39	707097,22
Massa armat actiu (kg)	-	46271	355303
Cost formigó (€)	19.749,00	182.257,50	877.327,50
Cost llast (€)	4.621,40	100.625,00	877.205,00
Cost armat passiu (€)	13.403,72*	150.506,08	1.060.645,83
Cost armat actiu (€)	34.118,56*	166.575,74	1.279.092,82
Cost total estructura (€)	71.892,68	599.964,33	4.094.271,15

*extrapolació amb les dades dels altres WindCrete, en sintonia amb els percentatges obtinguts per l'equip de recerca de la UPC [46]

Taula 7. Informació de les estructures de formigó pretensat, armat i amb llast a l'interior.

S'observa la minoració significativa del centre de gravetat en la segona situació gràcies a l'acció del llast que ubica el centre de gravetat (cdg) per sota del centre de flotació (cdf), proporcionant l'estabilitat hidroestàtica requerida. La magnitud d'aquest paràmetre està representada segons la posició respecte del nivell mig del mar. Amb referència als valors calculats per l'equip de recerca, el codi generat en el present treball presenta un 99,47% de semblança pel càlcul del cdg.

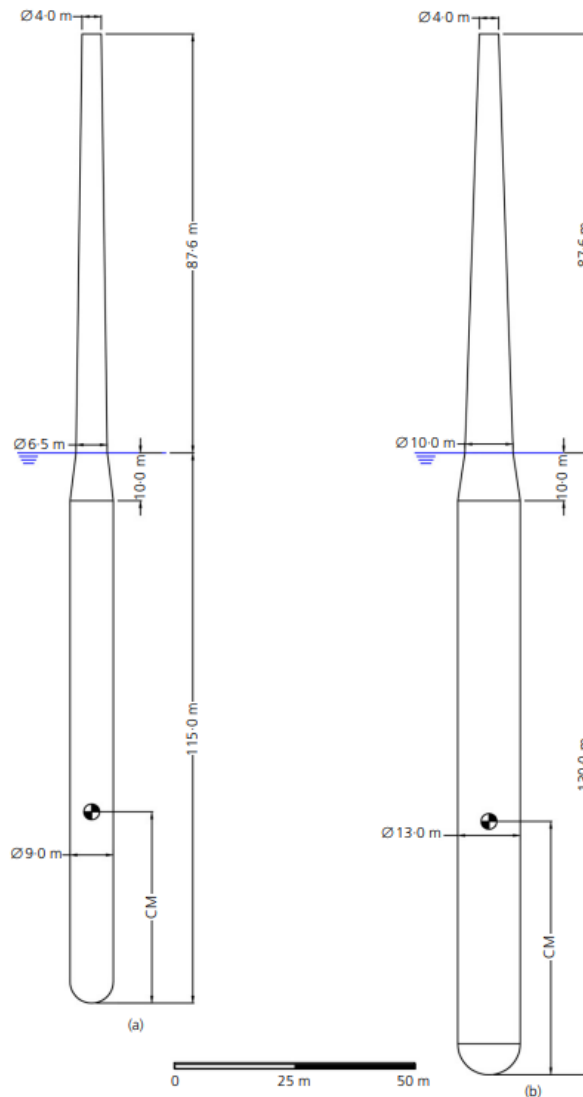
Es visualitza que, en les estructures on s'ha pogut obtenir informació de l'armat, el cost del llast ronda el 19% del cost total, la despesa per l'estructura de formigó és de l'ordre del 25%, el cost de les armadures passives representa un 25% i la partida més important consta de l'armat actiu de tendons posttesats amb aproximadament un 30% de la despesa total. Les armadures computen al voltant del 55-65% del cost total. Aquestes proporcions estan notablement en sintonia amb el WindCrete 5 MW [46], on els percentatges són del 12%, 23%, 23% i 42%, respectivament. No obstant, la partida on s'observa major desviació és l'armat actiu, l'únic element on els amidaments no s'han obtingut amb les eines i codis descrits en aquest treball. Es posa de manifest la necessitat d'obtenir els amidaments d'aquesta partida de forma més detallada.

Tal i com s'observa a la Taula 7, no s'han pogut obtenir les dades de l'armat del WindCrete 100 kW i per aquesta raó s'ha extrapolat el cost de les armadures segons els percentatges esmentats.

Es conclou que la plataforma de 15 MW és l'estructura més competitiva econòmicament ja que presenta el mínim cost per unitat de potència. Això es deu al fet que, respecte del model de 2 MW, la quantitat de formigó per unitat de potència és un 35% menor. La resta d'amidaments per unitat de potència tenen una magnitud similar. Alhora és el model que presenta una ràtio entre el centre de gravetat i el centre de flotació més elevada respecte les altres alternatives, proporcionant més estabilitat a la plataforma.

7.2 COMPARACIÓ ENTRE DIFERENTS MATERIALS

En la present anàlisi s'ha generat una plataforma WindCrete 5 MW amb dos materials diferents per comparar els costos entre ambdues alternatives. En la línia dels diferents models creats en el transcurs d'aquest treball, primer s'ha modelat una estructura de formigó armat i pretensat. Seguidament s'ha generat la geometria de l'alternativa metàl·lica que utilitza simplement acer estructural. Les dimensions d'ambdues plataformes es mostren a continuació a la Figura 90.



	Quantity	Unitary cost
Concrete	3484 m ³	€150/m ³
Ballast	7944 t	€35/t
Passive steel	344 630 kg	€1.5/kg
Active steel	260 388 kg	€3.6/kg

Table 13. Concrete spar material quantities

	Quantity	Unitary cost
Structural steel	1.98 × 10 ⁶ kg	€3/kg
Ballast	5001 t	€35/t

Table 14. Steel spar costs

	Cost: 000€	
	Concrete	Steel
Structural steel	—	5910
Concrete	522.6	—
Passive steel	516.9	—
Active steel	937.4	—
Ballast	278.0	175.0
Total cost	2254.9	6115.0

Figura 90. Estructures WindCrete: d'acer estructural (esquerra) i de formigó armat i pretensat (dreta) [46].

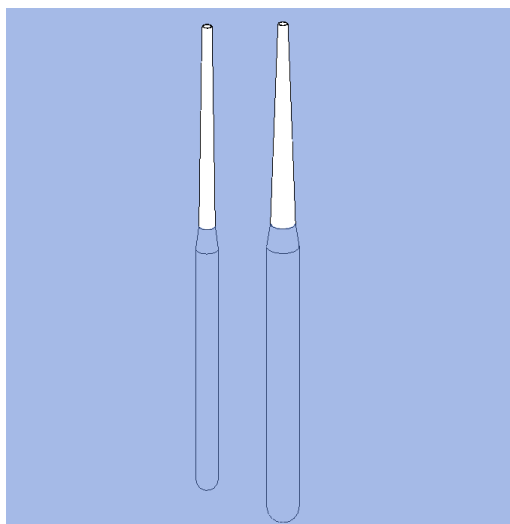


Figura 91. Plataformes d'acer (esquerra) i formigó (dreta) creades fixant les dimensions al codi.

A la següent Taula 8 es mostren les característiques geomètriques per inserir als codis de la Funció WindCrete i generar l'estructura monolítica. A falta d'informació sobre les armadures en el cas de la plataforma de formigó s'han emprat els valors de la Figura 90.

WindCrete 5 MW		
Material	Estructura d'acer	Estructura de formigó
Draft (m)	115	130
Altura torre (m)	87,6	87,6
Altura transició (m)	10	10
Diàmetre flotador (m)	9	13
Diàmetre transició (m)	6,5	10
Diàmetre torre (m)	4	4
Espessor flotador i transició (m)	0,6	0,5
Espessor torre (m)	0,4	0,4
Altura llast (m)	43,2	30,15
Cdg (m)	-73,72	-77,62
Cdf (m)	-57,37	-64,42
Empenta (kN)	56309,6	143205,73
Volum estructura (m ³)	242	3250
Massa estructura (t)	1900	8125
Amidaments llast (t)	5000	7950
Massa armat passiu (kg)	-	344600
Massa armat actiu (kg)	-	260388
Cost estructura (€)	5.700.000	487.500
Cost armadures passives (€)	-	516.900
Cost armadures actives (€)	-	937.400
Cost llast (€)	175.000	278.250
Cost total (€)	5.875.000	2.220.050

Taula 8. Comparació entre l'estructura metàl·lica i la solució en formigó armat i pretensat.

Es verifica que la solució pionera del disseny monolític de formigó és un 62% més econòmica en relació als costos dels materials. Encara que aquesta solució utilitzi considerablement més material estructural, l'estructura metàl·lica té un cost d'un ordre de magnitud superior respecte l'estructura monolítica de formigó ja que l'acer és un material molt més costós. En la mateixa línia que els resultats obtinguts amb els WindCrete de 100 kW, 2 MW i 15 MW, es comprova que el cost més important de la plataforma flotant de formigó no és l'estructura sinó l'armat, que representa un 65% del cost total dels materials. Concretament, el disseny d'aquesta subestructura ha de prestar especial atenció al dimensionament, execució i manteniment de les armadures actives posttensades, ja que són la partida més costosa i computen un 42% del cost total.

8. CONCLUSIONS

La recerca realitzada en aquest projecte permet la modelització paramètrica d'una plataforma per a molins de vent flotants WindCrete mitjançant tres metodologies que empen les eines BIM. A partir de l'aplicació d'aquests mètodes es poden extreure les següents conclusions:

1. Modelització paramètrica amb Revit

La creació d'una família paramètrica WindCrete a partir de la discretització de la seva geometria és un mètode apropiat per realitzar un model únicament de l'estructura. Aquesta casuística engloba les subestructures que no contemplen armadures, és a dir, les plataformes metàl·liques. La principal informació extreta del model és el volum de la subestructura.

2. Modelització paramètrica amb Revit i Dynamo

Al llarg de la investigació duta a terme en aquest projecte, s'ha comprovat que la inclusió del software Dynamo (que es troba dins del Revit) resulta un gran valor afegit. Aquesta eina permet generar tot tipus d'elements de forma paramètrica. En el cas de la família WindCrete objecte d'aquest estudi, els nodes Dynamo emprats permeten a l'usuari definir les variables d'entrada de forma més àgil i, alhora, obtenir informació essencial sobre l'estabilitat hidroestàtica de la plataforma, amb els valors del centre de gravetat i del centre de flotació.

3. Modelització paramètrica amb codi Python

La recerca efectuada permet concloure que l'única forma de generar plataformes paramètriques de formigó armat i pretensat WindCrete amb Revit és mitjançant un codi Python executat amb Dynamo. L'usuari defineix la geometria de la subestructura, el material i les característiques dels armats per modelitzar el WindCrete en la seva totalitat. Els tendons posttensats són l'únic element que no contempla el Revit, i s'ha considerat una forma alternativa per la seva modelització. Finalment, es poden extreure les informacions dels amidaments i de les propietats hidroestàtiques.

Es conclou que s'han complert els objectius principals plantejats a l'inici d'aquest estudi. D'una banda, s'han investigat les diferents possibilitats per generar models WindCrete paramètrics amb l'estructura de formigó armat i pretensat. S'ha creat una forma eficient -i visual de cara a l'usuari- per introduir els valors d'entrada i per obtenir tant l'estructura tridimensional com la informació associada. El centre de gravetat calculat amb el codi ofereix una correlació del 99,47% en comparació amb els valors de l'equip de recerca. La informació d'amidaments i de propietats hidroestàtiques és fonamental en el predimensionament de plataformes flotants, on es duen a terme diferents anàlisis d'alternatives des del punt de vista estructural i econòmic. L'eina desenvolupada permet optimitzar aquesta etapa, que actualment computa aproximadament un 4% dels CAPEX.

D'altra banda, seguint les dimensions del BIM, s'han estudiat dues aplicacions d'aquesta metodologia al model:

- **L'anàlisi 3D** s'ha efectuat mitjançant el clash detection, per detectar les interferències entre els diferents elements que conformen la plataforma -armadures, parets de formigó i estructures secundàries-. També s'ha dut a terme la representació gràfica del projecte amb seccions constructives bidimensionals, vistes de detalls tridimensionals i renderitzacions. Es pot afirmar que les vistes generades complementen convenientment les seccions constructives tradicionals. Tanmateix, l'accés al model 3D per part de tots

els agents de l'obra en totes les etapes del projecte, millora la interpretació dels plànols per reduir errors i demores, disminuint potencialment el LCOE.

- Amb la informació associada dels amidaments de la plataforma s'ha realitzat l'**anàlisi 5D**, que consta de l'obtenció del pressupost del model WindCrete. Els costos de l'estructura s'obtenen depenent de les variables d'entrada geomètriques definides en el codi. S'han comparat els valors del model paramètric WindCrete 5 MW amb les dades de l'equip de recerca de la UPC, obtenint una coincidència significativa. L'armat actiu, al no poder-se modelitzar com un element del Revit, és l'element amb una major desviació dels amidaments i cost, amb un 70% de similitud considerant les proporcions de l'equip de recerca. Sense considerar les armadures actives, la resta de partides presenten una afinitat en l'aproximació del cost major, amb una semblança del 90%.

Amb els codis desenvolupats en el marc d'aquest projecte, es poden estimar els costos associats a la plataforma del molí de vent flotant comptant les despeses dels materials, del procés de construcció i del transport. La subestructura és la partida més important des del punt de vista econòmic, ja que computa un 27% dels CAPEX segons el laboratori nacional d'energia renovable dels Estats Units (NREL), i, per aquesta raó, és essencial obtenir aquesta despesa en l'etapa del predimensionament de la plataforma.

Les estructures per a molins de vent flotants, al tractar d'un àmbit concret i pioner, en l'actualitat no són dels elements típicament modelitzats amb els programes que usen la metodologia BIM com Autodesk Revit. Tampoc és habitual parametritzar infraestructures mitjançant codis per generar armadures o tendons posttesats. Per aquests dos motius, al llarg d'aquest estudi, s'han trobat un conjunt d'obstacles relatius a la parametrització de la geometria, a la creació d'elements estructurals -famílies- amb una geometria concreta o al trasllat d'informació entre softwares. No obstant, s'han anat superant aquestes dificultats mitjançant les metodologies descrites en el present projecte. Es conclou que el software està en un punt de maduresa significatiu per la quantitat d'eines que ofereix però també es reconeixen les complexitats que es presenten al modelitzar paramètricament elements amb geometries complexes, armadures estructurals i cables d'acer (tendons posttesats, amarres). S'arriba a la conclusió d'afirmar la viabilitat actual per la modelització paramètrica de plataformes eòliques flotants mitjançant la metodologia BIM, sense prescindir dels programaris per efectuar l'anàlisi hidrodinàmic, aerodinàmic i estructural.

Finalment, s'han observat nombrosos avantatges per l'aplicació BIM als projectes eòlics marins. En primer lloc, en el procés d'expansió tecnològica que es troba la indústria, resulta essencial comptar amb dissenys paramètrics -i amb informació associada- per actualitzar les plataformes a les necessitats estructurals de les turbines. En segon lloc, la recerca ha permès constatar que en aquests projectes hi col·laboren un gran nombre d'agents, entre els quals: el promotor, l'administració pública, l'enginyeria d'estructures, els contractistes, les instal·lacions elèctriques i els responsables de les tasques de manteniment de la plataforma. La metodologia BIM ofereix les eines per proporcionar un entorn col·laboratiu mitjançant la interoperabilitat de software, per desenvolupar així les diferents vistes, plànols i models. Aquest fet permet optimitzar la gestió del projecte al llarg de la vida útil del parc eòlic, reduint el LCOE de forma potencial. Per últim, es considera que el viratge cap a la digitalització de les infraestructures és innegable pels múltiples avenços tecnològics i pels beneficis que s'obtenen. En aquesta línia, s'estima que la perspectiva del sector serà la unió de la metodologia BIM amb els programes de càlcul i els Digital Twins.

9. FUTURE WORK

Aquest treball engloba una introducció de l'aplicació del BIM a l'eòlica marina offshore, ja que la metodologia BIM tracta d'un camp molt polivalent amb nombrosos àmbits d'actuació. Per aquest motiu, s'ha considerat oportú plantejar el present apartat on s'exposen -per ordre de possible factibilitat- les diferents línies d'acció per profunditzar en la recerca d'aquesta temàtica.

Primerament, l'estudi realitzat permet donar per finalitzada la tasca d'investigar les diferents metodologies per parametritzar l'estructura monolítica de formigó armat i pretensat. No obstant, existeixen altres elements essencials que es podrien modelitzar paramètricament i amb un nivell de detall més precís. Això significa que caldria generar famílies paramètriques de cada element, definir el tipus d'unió a l'estructura considerant l'anàlisi de col·lisions, i efectuar l'anàlisi estructural de la família exportant l'arxiu a Autodesk Robot. Aquests components podrien tractar de la plataforma d'accés, les plataformes interiors, les escales, les instal·lacions elèctriques, les amarres i els ancoratges. També s'hauria de modelar -amb col·laboració del fabricant- la turbina eòlica concreta amb la informació sobre el pes, el procés d'instal·lació i els equips elèctrics, entre d'altres. Addicionalment, es podria estudiar el mètode per afegir tota la informació dels elements estructurals (relativa al fabricant, cost, procés de construcció, agent de l'obra encarregat, etc.), perquè l'arxiu IFC proporcioni l'entorn col·laboratiu inherent del BIM. Tanmateix, es podria plantejar afegir la topografia del subsol marí amb la finalitat d'emplaçar els aerogeneradors -amb ancoratges i amarres- en la ubicació corresponent, per modelitzar el parc eòlic en la seva totalitat.

Posteriorment, amb la informació associada dels elements estructurals, caldria dur a terme les dimensions BIM que han quedat fora de l'abast d'aquest projecte. Aquestes anàlisis tracten de la planificació temporal (4D), dels informes de sostenibilitat (6D) i de la gestió i operació del projecte (7D). Concretament, seria interessant desglossar les partides que conformen el WindCrete a fi d'obtenir la planificació temporal i el cost detallat per cada element de la plataforma. Subseqüentment, es podria afegir aquesta informació als programes respectius de Navisworks i TCQ per tal que aquestes dades estiguin dins del model BIM. Caldria investigar la parametrització dels valors temporals i econòmics perquè les variacions en la geometria de la plataforma impliquin modificacions en la planificació temporal i en el pressupost final.

Per últim, es podrien considerar els àmbits més complexos d'abordar: l'anàlisi estructural i el monitoratge de la plataforma en la fase d'explotació. D'una banda, es podria investigar l'exportació del model BIM del WindCrete, amb armadures passives i actives, al software d'Autodesk Robot. Al tractar d'un programari d'anàlisi estructural convencional, caldria modelitzar la plataforma com una biga contínua, aproximant les condicions a les quals està sotmesa l'estructura mitjançant condicions de contorn i càrregues estàtiques. També es podria estudiar la compatibilitat entre el model BIM generat amb Python i altres softwares que permeten l'anàlisi dinàmic amb càrregues cícliques, l'obtenció dels moviments, rotacions i oscil·lacions de l'estructura, i la verificació estructural considerant la flexocompressió i la fatiga. D'altra banda, seria interessant idear la creació d'un Digital Twin associat al model BIM, per dur a terme el monitoratge en la fase d'operació i estudiar la potencial minoració dels OPEX en aquest sentit.

10. BIBLIOGRAFIA

- [1] Our World in Data. (2021). *Energy mix: what sources do we get our energy from?* [En línia]. Consultat el 22/05/2022. Disponible a: <https://ourworldindata.org/energy-mix>
- [2] IPCC. (2021). *AI: Greenhouse Gases: Sources and Sinks*. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- [3] European Commission. (2019). *A European Green Deal*. [En línia]. Consultat el 25/05/2022. Disponible a: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en#actions
- [4] Our World in Data. (2020). *Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from?* [En línia]. Consultat el 22/05/2022. Disponible a: https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector?fbclid=IwAR0SosUCfZHcacYvGATExf5llpf_RxMVbSwHhj5lwVOQms9RYXIFNSF8qfA
- [5] European Commission. (2020). *Climate Action. Consequences of climate change*. [En línia]. Consultat el 25/05/2022. Disponible a: https://ec.europa.eu/clima/climate-change/consequences-climate-change_es
- [6] WHO. (2021). *Climate change and health*. World Health Organization. [En línia]. Consultat el 25/05/2022. Disponible a: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>
- [7] IPCC. (2018). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.001>
- [8] UNFCCC. (2015). *The Paris Agreement*. United Nations Framework Convention on Climate Change. [En línia]. Consultat el 28/05/2022. Disponible a: <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/el-acuerdo-de-paris>
- [9] European Commission. (2020). *Recovery plan for Europe. NextGenerationEU*. [En línia]. Consultat el 28/05/2022. Disponible a: https://ec.europa.eu/info/strategy/recovery-plan-europe_es
- [10] IEA. (2021). *Spain Energy Policy Review*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/articles/spain-electricity-security-policy>
- [11] European Commission. (2020). *Eurostat. Energy imports*. [En línia]. Consultat el 30/05/2022. Disponible a: <https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy/bloc-2c.html>
- [12] UN. (2015). *United Nations Sustainable Development Goals*. [En línia]. Consultat el 28/05/2022. Disponible a: <https://sdgs.un.org/goals>

- [13] IEA. (2021). *Renewables 2021. Analysis and forecast to 2026*. International Energy Agency. Disponible a: <https://www.iea.org/reports/renewables-2021>
- [14] European Commission. (2020). *Eurostat. Renewable energy statistics*. [En línia]. Consultat el 03/06/2022. Disponible a: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics.
- [15] Our World in Data. (2020). *Renewable Energy*. [En línia]. Consultat el 03/06/2022. Disponible a: <https://ourworldindata.org/renewable-energy>.
- [16] Lerch, M., De-Prada-Gil, M., Molins, C., Benveniste, G. (2018) Sensitivity analysis on the levelized cost of energy for floating offshore wind farms. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 30, 77-90. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.09.005>
- [17] IRENA. (2021). *Renewable power generation costs in 2020*. International Renewable Energy Agency. ISBN 978-92-9260-348-9. Disponible a: <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020>
- [18] LAZARD. (2021). *Levelized Cost of Energy Analysis, Version 15.0*. Disponible a: <https://www.lazard.com/media/451881/lazards-levelized-cost-of-energy-version-15-0-vf.pdf>
- [19] GWEC. (2022). *Global Wind Report*. Global Wind Energy Council. Disponible a: <https://gwec.net/global-wind-report-2022/>
- [20] IRENA. (2020). *Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050*. International Renewable Energy Agency. ISBN: 978-92-9260-238-3. Disponible a: <https://www.irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020>
- [21] IRENA. (2020). *Offshore renewables: an action agenda for deployment*. International Renewable Energy Agency. ISBN 978-92-9260-349-6. Disponible a: <https://www.irena.org/publications/2021/Jul/Offshore-Renewables-An-Action-Agenda-for-Deployment>
- [22] MITECO. (2021). *Hoja de ruta eólica marina y energías del mar en España*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Disponible a: <https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/desarrollo-eolica-marina-energias/default.aspx>
- [23] GWEC. (2021). *Global Offshore Wind Report*. Global Wind Energy Council. Disponible a: <https://gwec.net/global-offshore-wind-report-2021/>
- [24] Global Wind Atlas. (2022). *Pàgina web Global Wind Atlas*. [En línia] Consultat el 08/06/2022. Disponible a: <https://globalwindatlas.info/>
- [25] Windeurope. (2021). *Wind energy in Europe: 2021 Statistics and the outlook for 2022-2026*. Disponible a: <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2021-statistics-and-the-outlook-for-2022-2026/>

- [26] IEA. (2019). *Offshore Wind Outlook*. International Energy Agency. Disponible a: <https://www.iea.org/reports/offshore-wind-outlook-2019>
- [27] Díaz, J. M. G. (2013). Cuantificación del perfil del viento hasta 100 m de altura desde la superficie y su incidencia en la climatología eólica. *Terra*, 29(46), 81-101.
- [28] Wisser, R., Rand, J., Seel, J. (2021). Expert elicitation survey predicts 37% to 49% declines in wind energy costs by 2050. *Nature Energy*, 6, 555–565. <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00810-z>
- [29] RAEng. *Wind Turbine Power Calculations*. Royal Academy of Engineering. [En línia]. Consultat el 10/06/2022. Disponible a: <https://www.raeng.org.uk/publications/other/23-wind-turbine>
- [30] Jamdade, P.G., Patil, S.V., Jamdade, S.G. (2013). Assessment of Power Coefficient of an Offline Wind Turbine Generator System. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2(9), 41–48.
- [31] Siddappaji, K. (2014). High Efficiency and Cost-Effective Hydrokinetic Turbines.
- [32] Mathern, A., von der Haar, C., Marx S. (1995). Concrete Support Structures for Offshore Wind Turbines: Current Status, Challenges, and Future Trends. *Energies*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/en14071995>
- [33] WFO. (2021). *Global Offshore Wind Report*. World Forum Offshore Wind. Disponible a: <https://wfo-global.org/reports/>
- [34] EMODnet. (n.d.). *Bathymetry Portal. Understanding the topography of european seas*. [En línia]. Consultat el 11/06/2022. Disponible a: <https://www.emodnet-bathymetry.eu/>
- [35] Konstantinidis, E. I., Botsaris, P. N. (2016). Wind turbines: current status, obstacles, trends and technologies. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 161(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/161/1/012079>
- [36] Tethys. (n.d.). *Capturing energy from offshore wind with bottom-mounted foundations*. Environmental Effects of Wind and Marine Renewable Energy. U.S. Department of Energy. [En línia]. Consultat el 12/06/2022. Disponible a: <https://tethys.pnnl.gov/technology/fixed-offshore-wind>
- [37] Wang, C. M., Utsunomiya, T., Wee, S. C., Choo, Y. S. (2010). Research on floating wind turbines: a literature survey. *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, 3(4), 267-277. <https://doi.org/10.1080/19373260.2010.517395>
- [38] ACTEON. (2020). *Floating wind: what are the mooring options?*. [En línia]. Consultat el 12/06/2022. Disponible a: <https://acteon.com/blog/floating-wind-mooring-options/>
- [39] Ma, K.-T., Luo, Y., Kwan, T., Wu, Y. (2019). *Mooring System Engineering for Offshore Structures*. Elsevier BV.

- [40] Sant, T., Cuschieri, K. (2016). Comparing three aerodynamic models for predicting the thrust and power characteristics of a yawed floating wind turbine rotor. *Journal of Solar Energy Engineering* 138(3). <https://doi.org/10.1115/1.4032684>
- [41] Bäckström, V., Skarbratt, A. (2010). Maritime ISAR Imaging with Airborne Radar. *Master's Thesis, Chalmers University of Technology.*
- [42] RECHARGE. (2017). *Floating wind pioneers Glosten and Gicon join up for next-gen TLPs*. Global news and intelligence for the Energy Transition. [En línia]. Consultat el 13/06/2022. Disponible a: <https://www.rechargenews.com/wind/floating-wind-pioneers-glosten-and-gicon-join-up-for-next-gen-tlps/2-1-79267>
- [43] Ocean Winds. (2022). *Windfloat Atlantic project*. [En línia]. Consultat el 13/06/2022. Disponible a: <https://www.oceanwinds.com/projects/windfloat-atlantic-project/>
- [44] Floatgen. (2022). *Floatgen: wind power going further offshore*. [En línia]. Consultat el 13/06/2022. Disponible a: <https://floatgen.eu/>.
- [45] IRENA. (2016). *Floating foundations: a game changer for offshore wind power*. International Renewable Energy Agency. ISBN 978-92-95111-07-3. Disponible a: <https://www.irena.org/publications/2016/Dec/Floating-foundations-A-game-changer-for-offshore-wind>
- [46] Campos, A., Molins, C., Gironella, X., Trubat, P. (2016). Spar concrete monolithic design for offshore wind turbines. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Maritime Engineering*. 169(2), 49-63. <http://dx.doi.org/10.1680/jmaen.2014.24>
- [47] Choisnet, T., Geschier, B., Vetrano, G. (2016). Initial comparison of concrete and steel hulls in the case of Ideol's square ring floating substructure. *World Wind Energy Conference*.
- [48] The Concrete Centre. (2017). *Concrete Towers For Onshore and Offshore Wind Farms*. MPA The Concrete Centre. ISBN: 1-904818-48-X.
- [49] Pérez, R., Lamas, M., (2013). Offshore concrete structures. *Ocean Engineering*, 58, 304-316. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.11.007>
- [50] Windcrete. (2022). Pàgina web de WindCrete. [En línia]. Consultat el 13/06/2022. Disponible a: <https://www.windcrete.com/>.
- [51] IECA. (2013). *Guía técnica: Hormigón en ambiente marino*. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. Disponible a: <https://victoryepes.blogs.upv.es/files/2018/07/HormigonambientemarinomIECA.pdf>
- [52] CBIM. (2022). *Comisión Interministerial para la incorporación de la Metodología BIM en la licitación pública*. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. [En línia]. Consultat el 20/07/2022. Disponible a: <https://cbim.mitma.es/>
- [53] All3DP. (2021). *Autocad 3D print*. Pàgina web de All3DP. [En línia]. Consultat el 20/07/2022. Disponible a: <https://all3dp.com/2/3d-printing-from-autocad/>

- [54] LATEEF ENGINEERING. (2022). *BIM Modeling Services*. Pàgina web de Lateef. [En línia]. Consultat el 21/07/2022. Disponible a: <https://lateef-eng.com/bim-modeling/>
- [55] Casa solo arquitectos. (2017). *Implementación BIM en despachos de arquitectura*. Pàgina web de Casa solo arquitectos. [En línia]. Consultat el 21/07/2022. Disponible a: <https://casasolo.es/implementacion-bim-en-despachos-de-arquitectura/>
- [56] Martín, N., González de Chaves, P., Roldán, M. (2015). Building information modeling (BIM): Una oportunidad para transformar la industria de la construcción. *Spanish Journal of Building Information Modeling*, 14(1), 12-18. ISSN-e 2386-5784.
- [57] McKinsey Global Institute. (2015). *Digital America: A tale of the haves and have-mores*. Disponible a: <https://www.mckinsey.com/industries/technology-media-and-telecommunications/our-insights/digital-america-a-tale-of-the-haves-and-have-mores>
- [58] McKinsey Global Institute. (2020). *The next normal in construction How disruption is reshaping the world's largest ecosystem*. Disponible a: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/the-next-normal-in-construction-how-disruption-is-reshaping-the-worlds-largest-ecosystem>
- [59] ONS. (2022). *Productivity measures*. Office for National Statistics. UK Statistics Authority. [En línia]. Consultat el 22/07/2022. Disponible a: <https://www.ons.gov.uk/economy/economicoutputandproductivity/productivitymeasures>
- [60] McGraw Hill Construction. (2014). *The Business Value of BIM for Construction in Major Global Markets*. Disponible a: <https://www.construction.com/toolkit/reports/bim-business-value-construction-global-markets>
- [61] European Construction Sector Observatory. (2021). *Digitalisation in the construction sector*. European Commission. Disponible a: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/45547>
- [62] iTec. (2020). *La implantación del BIM en España*. Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya. [En línia]. Consultat el 23/07/2022. Disponible a: <https://itec.es/servicios/bim/implantacion-bim-en-espana/>
- [63] European Construction Sector Observatory. (2019). *Building Information Modelling in the EU construction sector*. European Commission. Disponible a: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/34518>
- [64] Borisade, F., Gruber, J., Hagemann, L., Kretschmer, M., Lemmer, F., Müller, K., Schlipf, D., Nguyen, ND., Vita, L. (2015). State-of-the-art FOWT design practice and guidelines. Lifes50+ d7.4
- [65] Martinez, A., Iglesias, G. (2022). Mapping of the levelised cost of energy for floating offshore wind in the European Atlantic. *Renew. Sust. Energ. Rev*, 154. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111889>.

- [66] Manolas, D.I., Riziotis, V.A., Papadakis, G.P., Voutsinas, S.G. (2020). Hydro-Servo-Aero-Elastic Analysis of Floating Offshore Wind Turbines. *Fluids*, 5(200). <https://doi.org/10.3390/fluids5040200>
- [67] Pham, D., Dinh, M., Kim, H., Nguyen, T. (2021). Simplified Floating Wind Turbine for Real-Time Simulation of Large-Scale Floating Offshore Wind Farms. *Energies* 14(15). <https://doi.org/10.3390/en14154571>
- [68] DNV. (2022). Industry workflows for floating offshore wind. Pàgina web de DNV. [En línia]. Consultat el 03/08/2022. Disponible a: <https://www.dnv.com/software/services/software-for-offshore-wind/floating-offshore-wind.html>
- [69] Alvarez, L., Koob, M., Diaz, J., Minnert J. (2016). Optimization of a hybrid tower for onshore wind turbines by Building Information Modeling and prefabrication techniques. *Visualization in engineering*, 4(1). <https://doi.org/10.1186/s40327-015-0032-4>
- [70] Ciuriuc, A., Rapha, J.I., Guanche, R., Domínguez-García, J.L. (2022). Digital tools for floating offshore wind turbines (FOWT): A state of the art. *Energy Rep*, 8, 1207–1228. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.12.034>
- [71] Murphy O. (2016). Building Information Modelling for offshore wind projects. *Catapult offshore renewable energy*.
- [72] Jia, J., Dou, S., Yang, S., Wu, Y., Cao, F., Li, B., Cui, H. (2019, June 16-21). Study on the application framework of BIM in the life cycle management of offshore wind farms. *In Proceedings of the 29th International Ocean and Polar Engineering Conference*, Honolulu, HI, USA.
- [73] AENOR. Aerogeneradores. Medidas de protección. Requisitos para diseño, operación y mantenimiento. UNE-EN 50308. España 2005.
- [74] AENOR. Seguridad de las máquinas. Medios de acceso permanentes a máquinas. Parte 4: Escalas fijas. UNE-EN ISO 14122-4. España 2017.
- [75] ChronicleLive. (2017). Five 15,000 tonne wind turbine foundations successfully installed off the Northumberland coast. Pàgina web de ChronicleLive. [En línia]. Consultat el 24/08/2022. Disponible a: <https://www.chroniclelive.co.uk/business/business-news/five-15000-tonne-wind-turbine-13610110>
- [76] John Cockerill. (2022). *Services to wind technology*. [En línia]. Consultat el 24/08/2022. Disponible a: <https://johncockerill.com/en/services/energy/services-to-wind-energy/>
- [77] Wind Turbine Models. (n.d.). Vestas V80-2.0. Pàgina web de Wind Turbine Models Consultat el 24/08/2022. Disponible a: <https://es.wind-turbine-models.com/turbines/19-vestas-v80-2.0>

ANNEX I. TIPUS DE PLATAFORMES EÒLIQUES FLOTANTS

1. SPAR

Les plataformes eòliques tipus SPAR (Single Point Anchor Reservoir) es basen en un disseny de geometria senzilla que consta d'un cilindre amb llast en el seu interior. El dipòsit de llast d'alta densitat a la part inferior de l'estructura proporciona una major altura metacèntrica i implica que l'estructura recupera la posició inicial quan està sotmesa a les accions externes.

Per tal de garantir la flotació de l'estructura minimitzant els desplaçaments i els girs, es necessita desplaçar un gran volum d'aigua. D'aquesta forma el cilindre presenta un calat significatiu i així aquesta alternativa és òptima pels emplaçaments situats a batimetries notables, és a dir, a partir dels 80-100 metres de profunditat [23] [45].

Les propietats mecàniques que presenten les plataformes tipus SPAR proporcionen un comportament adequat de l'estructura davant de les càrregues cícliques de l'onatge, del vent i de fenòmens com les corrents marines. Així l'estructura presenta una gran estabilitat i una alta resistència inercial als moviments més restrictius en el disseny, és a dir, els girs de capcineig (pitch) i balanceig (roll) [37].

En aquest cas les amarres s'instal·len amb forma de catenària. La senzillesa en l'amarratge i ancoratge proporciona una competitivitat econòmica d'aquesta alternativa [37]. El gran calat de l'estructura no permet el transport mitjançant el remolc vertical com en els altres tipus de plataformes. D'aquesta forma es necessita emprar vaixells de grans dimensions anomenats Heavy Lift Vessels i vaixells amb grues massives per tal de transportar i hissar les plataformes [23]. Actualment hi ha alternatives innovadores que plantegen el transport mitjançant el remolc en horitzontal aprofitant la flotabilitat inherent que proporciona la geometria cilíndrica, implicant una disminució del cost notòria [50]. Addicionalment es proposa hissar l'estructura mitjançant el dipòsit de llast a l'interior per minorar el centre de gravetat progressivament.

Amb la capacitat eòlica offshore acumulada al 2021, la subestructura tipus SPAR és l'alternativa flotant més emprada amb un 56% dels aerogeneradors. En el primer parc eòlic marí flotant anomenat Hywind Scotland (30 MW) s'ha emprat una plataforma tipus SPAR i tant la torre com la subestructura han estat construïts amb una estructura d'acer [23]. No obstant, en altres projectes també es planteja la combinació del formigó amb el material metàl·lic mitjançant subestructures de formigó i torres d'acer. El model Windcrete dissenyat a l'Escola de Camins proposa el disseny monolític de la plataforma SPAR amb formigó per tal de disminuir el LCOE [50].



Figura 92. Plataforma eòlica flotant tipus SPAR (Windcrete) [50]

2. BARCASSA (BARGE)

Aquestes plataformes consten d'estructures amb gran superfície que garanteixen l'estabilitat mitjançant el pla d'aigua, és a dir, augmentant la superfície de contacte entre l'estructura i el medi marí per distribuir la pressió hidroestàtica o flotabilitat. No obstant, degut al poc calat i la respectiva baixa altura metacèntrica, aquestes plataformes són les més sensibles als moviments de balanceig i capcineig provocats per les accions externes. Per aquesta raó algunes estructures inclouen una piscina interior per atenuar la càrrega induïda per l'onatge [23].

La principal avantatge és la simplicitat del disseny que ofereix flexibilitat en les diferents batimetries i la facilitat en la seva construcció i transport. Per la construcció d'aquest tipus de plataforma es pot emprar una estructura metàl·lica d'acer, una estructura de formigó o una estructura híbrida que utilitzi les sinèrgies d'ambdós materials. Aquesta última alternativa està emprada en el primer projecte pilot d'energia eòlica marina a França, l'anomenat projecte Floatgen dissenyat per BW Ideol (2 MW) [44].



Figura 93. Plataforma eòlica flotant tipus barcaça (Floatgen) [44]

3. SEMI-SUBMERGIBLE (SEMI-SUBMERSIBLE)

Les plataformes tipus semi-submergibles estan constituïdes per diverses columnes que distribueixen el pes de l'estructura per aconseguir la flotabilitat i estabilitat hidroestàtica de la plataforma. Aquestes columnes externes s'uneixen entre si mitjançant una estructura de gelosia per tal de transmetre i distribuir les càrregues de les accions externes. Així la geometria d'aquestes plataformes s'assimila a una combinació entre les dues tipologies d'estructures descrites anteriorment. A l'interior de les columnes s'hi posiciona una quantitat de llast (normalment aigua) per tal de minorar el centre de gravetat i augmentar així l'estabilitat de la plataforma [37].

És un tipus de plataforma en auge i amb gran potencial d'aplicació degut a la flexibilitat i estabilitat hidroestàtica que ofereix la sinèrgia entre ambdós mètodes. Al 2021 un 22% de les plataformes flotants en operació empraven aquesta tecnologia i el 64% dels projectes en desenvolupament consideren aquesta alternativa [23]. Un exemple d'aplicació és el projecte operatiu de WindFloat Atlantic (25MW), ubicat a la costa de Portugal.



Figura 94. Plataforma eòlica flotant tipus Semi-submergible (WindFloat Atlantic) [43]

4. TLP (TENSION LEG PLATFORM)

Aquest tipus de plataformes utilitzen l'últim mètode descrit per assegurar l'estabilitat hidrostàtica de l'estructura: l'ús d'amarres tesades. Les amarres consisteixen en tendons estructurals formats per l'agrupació de cables d'acer amb una camisa protectora. Aquests elements estructurals estan ancorats al subsol marí i garanteixen tant el manteniment de la posició com l'estabilitat estructural de l'estructura. L'ancoratge s'obté generalment mitjançant pilons de succió i així aquesta és l'alternativa flotant amb més dependència envers les propietats mecàniques del subsol marí.

Les característiques geomètriques i mecàniques de la plataforma on s'ubica la torre i la turbina produeixen una força d'empenta excessiva i impliquen una flotabilitat desmesurada de l'estructura [23]. Aquest fet permet que les amarres d'alta rigidesa estiguin sotmeses a grans esforços de tracció addicionals que impliquin la restricció dels moviments de la plataforma. S'obté així una gran estabilitat de la plataforma envers les accions externes de l'ambient marí mitjançant una subestructura lleugera. No obstant, degut a la falta d'estabilitat hidroestàtica de l'estructura quan manquen les amarres, es requereixen mesures addicionals pel transport i instal·lació. Així, per remolcar l'estructura verticalment fins l'emplaçament marí cal emprar vaixells especials per assegurar l'estabilitat de la plataforma [37] [45].

Actualment aquesta alternativa es troba en una fase d'experimentació degut a la complexitat del sistema d'amarres i ancoratge que afecta a la viabilitat tècnica i econòmica. Addicionalment la seguretat de l'estructura està compromesa amb el funcionament òptim de les amarres i de l'ancoratge, comportant riscos de fallada estructural de la plataforma en cas de problemàtiques de caràcter local als tendons. Així actualment no hi ha cap parc eòlic comercial que consideri aquesta alternativa i només el 7% dels projectes que es troben en les diferents etapes de desenvolupament consideren aquesta tipologia de plataforma [23]. Un dels principals impulsors d'aquesta tecnologia en el sector de l'eòlica marina és GICON i actualment ja han construït un prototip de 2,3MW per tal de seguir desenvolupant aquest concepte.

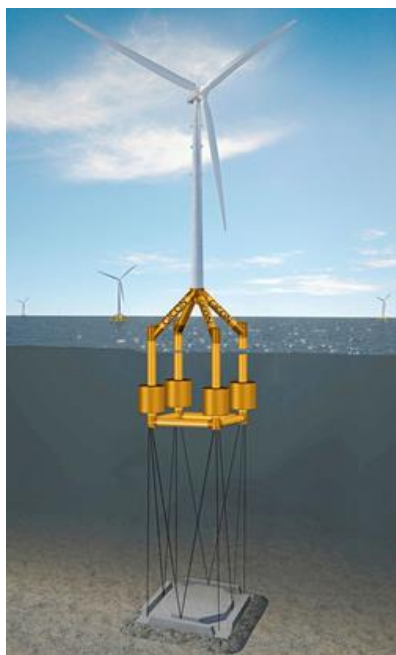


Figura 95. Plataforma eòlica flotant tipus TLP (GICON) [42]

ANNEX II. CODI WINDCRETE

```

import sys
import clr
clr.AddReference('ProtoGeometry')
from Autodesk.DesignScript.Geometry import *

##Definició de variables
llista_solds = []
llista_variables = IN[0]
n = llista_variables[0]

Cilindre_Altura= llista_variables[1]

Tronc1_Altura = llista_variables[2]
Tronc1_Diametre_inferior = llista_variables[3]
Tronc1_Diametre_superior = llista_variables[4]
Tronc1_Espessor = llista_variables[5]

Tronc2_Altura = llista_variables[6]
Tronc2_Diametre_superior = llista_variables[7]
Tronc2_Espessor = llista_variables[8]

Tronc3_Altura = llista_variables[9]
Tronc3_Diametre_superior = llista_variables[10]
Tronc3_Espessor = llista_variables[11]

Tronc4_Altura = llista_variables[12]
Tronc4_Diametre_superior = llista_variables[13]
Tronc4_Espessor = llista_variables[14]

Tronc5_Altura = llista_variables[15]
Tronc5_Diametre_superior = llista_variables[16]
Tronc5_Espessor = llista_variables[17]

Tronc6_Altura = llista_variables[18]
Tronc6_Diametre_superior = llista_variables[19]
Tronc6_Espessor = llista_variables[20]

Tronc7_Altura = llista_variables[21]
Tronc7_Diametre_superior = llista_variables[22]
Tronc7_Espessor = llista_variables[23]

Tronc8_Altura = llista_variables[24]
Tronc8_Diametre_superior = llista_variables[25]
Tronc8_Espessor = llista_variables[26]

Tronc9_Altura = llista_variables[27]
Tronc9_Diametre_superior = llista_variables[28]
Tronc9_Espessor = llista_variables[29]

Tronc10_Altura = llista_variables[30]
Tronc10_Diametre_superior = llista_variables[31]
Tronc10_Espessor = llista_variables[32]

Llast_Altura = llista_variables[33]

Densitat_Formigo = llista_variables[34]
Densitat_Llast = llista_variables[35]

```

```

llista_altures =
[Tronc1_Altura,Tronc2_Altura,Tronc3_Altura,Tronc4_Altura,Tronc5_Altura,Tronc6_Altura,Tronc7_Altura,Tronc8_Altura,Tronc9_Altura,Tronc10_Altura]
llista_diametres_sup =
[Tronc1_Diametre_superior,Tronc2_Diametre_superior,Tronc3_Diametre_superior,Tronc4_Diametre_superior,Tronc5_Diametre_superior,Tronc6_Diametre_superior,Tronc7_Diametre_superior,Tronc8_Diametre_superior,Tronc9_Diametre_superior,Tronc10_Diametre_superior]
llista_espessors =
[Tronc1_Espessor,Tronc2_Espessor,Tronc3_Espessor,Tronc4_Espessor,Tronc5_Espessor,Tronc6_Espessor,Tronc7_Espessor,Tronc8_Espessor,Tronc9_Espessor,Tronc10_Espessor]

##Definició de funcions
#Tronc de con
def tronc_de_con(elevacio,altura,diametre_inferior,diametre_superior,espessor):
    punt1 = Point.ByCoordinates(diametre_inferior/2, 0, elevacio)
    punt2 = Point.ByCoordinates(diametre_inferior/2-espessor, 0, elevacio)
    punt3 = Point.ByCoordinates(diametre_superior/2-espessor, 0, elevacio+altura)
    punt4 = Point.ByCoordinates(diametre_superior/2, 0, elevacio+altura)

    llista_punts_perfil_tronc = [punt1,punt2,punt3,punt4]
    perfil_tronc = Polygon.ByPoints([punt1,punt2,punt3,punt4])

    punt_0 = Point.ByCoordinates(0,0,0)
    vector_z=Vector.ByCoordinates(0,0,1)
    angle_ini=0
    angle_fin=360

    tronc = Solid.ByRevolve(perfil_tronc, punt_0, vector_z, angle_ini, angle_fin)

    return tronc

##Primer tronc de con
tronc_1 = tronc_de_con(-
Tronc1_Altura,Tronc1_Altura,Tronc1_Diametre_inferior,Tronc1_Diametre_superior,Tronc1_Espessor)

llista_solds.append(tronc_1)

##Bucle a partir del 2n tronc de con == tronc de con número i
elevacio=-Tronc1_Altura

for i in range(1,n):
    elevacio=elevacio+llista_altures[i-1]
    diametre_inf=llista_diametres_sup[i-1]
    tronc_i=tronc_de_con(elevacio,llista_altures[i],diametre_inf,llista_diametres_sup[i],llista_espessors[i])
)
    llista_solds.append(tronc_i)

#Cilindre
cilindre_desfase=-Tronc1_Altura-Cilindre_Altura
punt1 = Point.ByCoordinates(Tronc1_Diametre_inferior/2, 0,cilindre_desfase)
punt2 = Point.ByCoordinates(Tronc1_Diametre_inferior/2-Tronc1_Espessor, 0,cilindre_desfase)
punt3 = Point.ByCoordinates(Tronc1_Diametre_inferior/2-Tronc1_Espessor, 0,cilindre_desfase+Cilindre_Altura)
punt4 = Point.ByCoordinates(Tronc1_Diametre_inferior/2, 0,cilindre_desfase+Cilindre_Altura)

llista_punts_perfil_tronc = [punt1,punt2,punt3,punt4]
perfil_cilindre=Polygon.ByPoints([punt1,punt2,punt3,punt4])

punt_0 = Point.ByCoordinates(0,0,0)

```

```

vector_z=Vector.ByCoordinates(0,0,1)
angle_ini=0
angle_fin=360

cilindre = Solid.ByRevolve(perfil_cilindre, punt_0, vector_z, angle_ini, angle_fin)

llista_solidos.append(cilindre)

#Semiesfera
semiesfera_desfase=-Tronc1_Altura-Cilindre_Altura-Tronc1_Diametre_inferior/2
centre = Point.ByCoordinates(0,0,semiesfera_desfase+Tronc1_Diametre_inferior/2)
punt11 = Point.ByCoordinates(0, 0,semiesfera_desfase)
punt12 = Point.ByCoordinates(0, 0,semiesfera_desfase+Tronc1_Espessor)
punt13 = Point.ByCoordinates(Tronc1_Diametre_inferior/2-
Tronc1_Espessor, 0,semiesfera_desfase+Tronc1_Diametre_inferior/2)
punt14 =
Point.ByCoordinates(Tronc1_Diametre_inferior/2, 0,semiesfera_desfase+Tronc1_Diametre_inferior/2)

arc1 = Arc.ByCenterPointStartPointEndPoint(centre,punt14,punt11)
arc2 = Arc.ByCenterPointStartPointEndPoint(centre,punt13,punt12)
linia1 = Line.ByStartPointEndPoint(punt11,punt12)
linia2 = Line.ByStartPointEndPoint(punt13,punt14)

llista_linies = [arc1,arc2,linia1,linia2]
perfil_semiesfera = PolyCurve.ByJoinedCurves(llista_linies)

semiesfera = Solid.ByRevolve(perfil_semiesfera, punt_0, vector_z, angle_ini, angle_fin)

llista_solidos.append(semiesfera)

#Llast
llast_desfase=-Tronc1_Altura-Cilindre_Altura-Tronc1_Diametre_inferior/2+Tronc1_Espessor

centre_llast = Point.ByCoordinates(0,0,llast_desfase+Tronc1_Diametre_inferior/2-Tronc1_Espessor)
punt111 = Point.ByCoordinates(0, 0,llast_desfase)
punt112 = Point.ByCoordinates(0, 0,llast_desfase+Llast_Altura)
punt113 = Point.ByCoordinates(Tronc1_Diametre_inferior/2-
Tronc1_Espessor, 0,llast_desfase+Llast_Altura)
punt114 = Point.ByCoordinates(Tronc1_Diametre_inferior/2-
Tronc1_Espessor, 0,llast_desfase+Tronc1_Diametre_inferior/2-Tronc1_Espessor)

arc11 = Arc.ByCenterPointStartPointEndPoint(centre_llast,punt114,punt111)
linia11 = Line.ByStartPointEndPoint(punt111,punt112)
linia12 = Line.ByStartPointEndPoint(punt112,punt113)
linia13 = Line.ByStartPointEndPoint(punt113,punt114)

llista_linies_llast = [arc11,linia11,linia12,linia13]
perfil_llast = PolyCurve.ByJoinedCurves(llista_linies_llast)
punt_0 = Point.ByCoordinates(0,0,0)
vector_z=Vector.ByCoordinates(0,0,1)
angle_ini=0
angle_fin=360

llast = Solid.ByRevolve(perfil_llast, punt_0, vector_z, angle_ini, angle_fin)

llista_solidos.append(llast)

OUT = llista_solidos

```


ANNEX III. PARÀMETRES ASSOCIATS AL FORMIGÓ

A continuació es calculen els recobriments i solapaments a partir de la norma Código Estructural [posar la normativa]

○ **Classe d'exposició**

Tabla 27.1.a (continuación). Clases de exposición relativas al hormigón estructural

Designación de la clase	Descripción del entorno	Ejemplos informativos donde pueden existir las clases de exposición
4. Corrosión inducida por cloruros de origen marino		
XS1	Expuestos a aerosoles marinos, pero no en contacto directo con el agua del mar.	Elementos estructurales de hormigón armado o pretensado sometidos a los aerosoles marinos, ubicados en la costa o cerca de la costa.
XS2	Permanente y sumergida en agua de mar.	Elementos estructurales de hormigón armado o pretensado permanentemente sumergidos en agua marina.
XS3	Zonas de carrera de mareas afectadas por el oleaje o salpicaduras.	Elementos estructurales de hormigón armado o pretensado situados en zona de carrera de mareas, afectadas por el oleaje o salpicaduras.

○ **Recubriment nominal a partir del recubriment mínim i del control en l'execució**

$$C_{non} = C_{min} + \Delta C_{dev}$$

donde:

C_{non} : recubrimiento nominal, en mm.

C_{min} : recubrimiento mínimo, en mm, según los apartados 44.2.1, 44.3, 44.4 o 44.5.

ΔC_{dev} : margen de recubrimiento, en función del nivel de control de ejecución, y cuyo valor será conforme a la tabla 43.4.1.

Tabla 44.2.1.1.b Recubrimiento mínimo (mm), C_{min} , para las clases de exposición relacionadas con la corrosión por cloruros

Tipo de elemento	Cemento	Vida útil de proyecto (t_p) (años)	Clase de exposición			
			XS1,	XS2	XS3	XD1, XD2, XD3
Hormigón armado	CEM III/A, CEM III/B, CEM IV, , CEM II/B-V, CEM II/A-D u hormigón con adición de microsílíce superior al 6% o de cenizas volantes superior al 20%	50	25	30	45	35
		100	30	35	50	40
	CEM II/B-S, B-P	50	30	35	65	40
		100	35	40	70	45
	Resto de cementos utilizables, según el Artículo 28	50	40	45	*	*
		100	65	*	*	*
Hormigón pretensado	CEM II/A-D o bien CEM I con adición de humo de sílice superior al 6%	50	30	35	50	40
		100	35	40	65	45
	Resto de cementos utilizables, según el Artículo 28	50	45	55	*	*
		100	*	*	*	*

(*) Estas situaciones obligan a unos recubrimientos excesivos, desaconsejables desde el punto de vista de la ejecución del elemento. En estos casos, se recomienda realizar un estudio específico para establecer el espesor de recubrimiento necesario en función de las condiciones de agresividad y la vida útil requerida.

Tabla 43.4.1 Margen de recubrimiento en función del nivel de control de ejecución

Tipo de elemento	$\Delta cdev$ [mm]
Elementos prefabricados con nivel intenso de control en la instalación de prefabricación (en obra o ajena a la obra)	0
Elementos ejecutados <i>in situ</i> con nivel intenso de control de ejecución	5
Otros casos	10

○ **Longitud d'ancoratge**

$$l_b = \frac{\varphi \cdot f_{yd}}{4 \cdot \tau_{bd}} \rightarrow l_b(\varphi = 16mm) = 175 \text{ mm} ; l_b(\varphi = 20mm) = 220 \text{ mm}$$

amb:

$$\varphi = 16 \text{ mm} ; 20 \text{ mm}$$

$$f_{yd} = \frac{500}{1,15} = 435 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctm} = 2,25 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 4,40 \frac{N}{\text{mm}^2} = 9,90 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

○ **Longitud de solapament**

$$l_s = \alpha \cdot l_{b, \text{neta}} \rightarrow l_s(\varphi = 16mm) = 315 \text{ mm} ; l_s(\varphi = 20mm) = 395 \text{ mm}$$

Tabla 49.5.2.2 Valores de α

Distancia entre los empalmes más próximos (figura 49.5.2.2)	Porcentaje de barras solapadas trabajando a tracción, con relación a la sección total de acero					Barras solapadas trabajando normalmente a compresión en cualquier porcentaje
	20	25	33	50	>50	
$a \leq 10 \varnothing$	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	1,0
$a > 10 \varnothing$	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,0