

Treball de Fi de Màster

Màster Universitari en Enginyeria Industrial (MUEI)

**Anàlisi d'un sistema d'emmagatzematge d'energia
potencial en forma de blocs sòlids**

MEMÒRIA

Autor: Jaume Camps Izquierdo
Director: Oriol Gomis Bellmunt
Convocatòria: Juny del 2021



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

Aquest projecte parteix de dos premisses: les societats humanes necessiten energia continua i, si volem limitar l'acció del canvi climàtic, de fonts descarbonitzades. Aquest fet pren especial rellevància en indrets més desfavorits, amb condicions socials, econòmiques, ambientals i climàtiques adverses, on els sistemes renovables i els seus adherits sistemes d'emmagatzematge energètic es troben encara lluny dels objectius ambientals marcats internacionalment.

Observant els principals sistemes d'emmagatzematge energètic, veiem que pràcticament el 99% de la potència d'emmagatzematge a gran escala és atribuïble a les centrals hidràuliques de bombeig [1], mentre que els petits consums acostumen a recolzar-se mitjançant bateries electroquímiques. Les dues tecnologies són madures i comporten avantatges, però també inconvenients. La dificultat econòmica, el gran impacte ambiental i la no disposició de recursos hídrics fa que l'emmagatzematge hidràulic no sigui factible en molts indrets, mentre que les bateries electroquímiques utilitzen materials molts cops escassos, cars i contaminants, alhora que no proporcionen una gran potència de llarga duració.

És aquí on entren en joc els nous sistemes experimentals d'emmagatzematge d'energia en forma de blocs sòlids, sistemes que prometen unes característiques interessants i que han pres notorietat durant els últims anys. Tot i així, es tracta de tecnologies poc madures, encara en fase de prototip, i amb resultats energètics prometedors però no portats a la pràctica. En aquest treball es vol aportar llum sobre aquest tipus de sistemes, i obtenir una referència realista que podria servir a futurs projectes en aquest camp.

Primer, s'ha procedit a presentar diversos sistemes experimentals d'emmagatzematge d'energia en forma d'energia potencial a través d'un medi sòlid. Més concretament, s'ha analitzat en detall un model de central proposat per l'empresa suïssa Energy Vault, una central d'emmagatzematge d'energia potencial basada en un gran nombre de blocs sòlids, elevats mitjançant un sistema de grues. Durant l'anàlisi, es divideixen les avantatges i inconvenients del model i es proposen una sèrie de millores i correccions que es plasmen en un disseny propi d'una central de característiques homòlogues. Posteriorment, es dimensionen en detall les diferents parts i mecanismes que integren el prototip proposat, per tal d'aconseguir una instal·lació realista, funcional i més respectuosa amb el medi ambient que el model proposat per la mencionada empresa.

Finalment, a través de l'estudi dels resultats energètics i la valoració econòmica i ambiental del projecte, es busca situar la tecnologia dins el panorama actual de sistemes d'emmagatzematge energètic, i es proposen una sèrie de situacions i aplicacions on seria interessant o rentable construir una central com l'estudiada.

Sumari

SUMARI	4
1. PREFACI	7
1.1. Motivació.....	7
2. INTRODUCCIÓ	9
2.1. Objectius del projecte	10
2.2. Abast del projecte	11
3. L'EMMAGATZEMATGE D'ENERGIA	13
3.1. Sistemes d'emmagatzematge d'energia.....	13
3.2. Introducció als sistemes d'emmagatzematge d'energia potencial.....	14
3.2.1. Centrals hidroelèctriques de bombeig.....	16
3.2.2. Noves propostes d'emmagatzematge d'energia potencial.....	17
3.3. La proposta de Energy Vault	20
4. PRE-DISENY DE LA CENTRAL D'EMMAGATZEMATGE D'ENERGIA POTENCIAL	23
4.1. Anàlisi de les avantatges i deficiències del model proposat per Energy Vault	23
4.2. Desafiaments tècnics de rellevància.....	24
4.2.1. Disposició dels blocs emmagatzemadors	24
4.2.2. Ubicació correcta dels blocs en totes les operacions	25
4.2.3. Impacte de la força del vent	25
4.2.4. Sobrecàrregues	25
4.2.5. Moviments sísmics.....	26
4.2.6. Impacte negatiu en l'entorn.....	26
4.3. Modelatge inicial de la central d'emmagatzematge d'energia potencial.....	26
4.3.1. Objectius.....	26
4.3.2. Disposició i tipus de materials per ser utilitzats com a element emmagatzemador	27
4.3.3. Torres grua	28
4.3.4. Règims de funcionament: càrrega	34
4.3.5. Règims de funcionament: descàrrega	35
4.3.6. Règims de funcionament: equilibrador de xarxa	35
4.3.7. Paràmetres del moviment dels capçals.....	35
4.3.8. Disseny dels pisos superior i inferior	37
5. DISSENY DE LA CENTRAL D'EMMAGATZEMATGE D'ENERGIA	

POTENCIAL	39
5.1. Pre-dimensionament	39
5.1.1. Torres grua de referència.....	39
5.1.2. Contenedors de referència.....	39
5.2. Disseny de la central d'emmagatzematge d'energia potencial	41
5.2.1. Materials utilitzats com a element emmagatzemador	41
5.2.2. Excavació i creació del doble nivell.....	42
5.2.3. Disseny de l'estructura de torres grua.....	43
5.2.4. Dimensionament en alçat i planta de la instal·lació.....	46
5.2.5. Estructura de suport i torre central	49
5.3. Estudi del funcionament	53
5.3.1. Correspondència.....	53
5.3.2. Estudi del moviment combinat dels capçals.....	59
5.3.3. Estudi del moviment en càrrega.....	61
5.3.3.1. Estudi cinètic i temporal de la càrrega.....	62
5.3.3.2. Estudi energètic i potencial de la càrrega	69
5.3.4. Estudi del moviment en descàrrega	71
5.3.4.1. Estudi cinètic i temporal de la descàrrega	73
5.3.4.2. Estudi energètic i potencial de la descàrrega	77
5.4. Disseny de les instal·lacions elèctriques	79
5.4.1.1. Motors/generadors i motors auxiliars.....	80
5.4.1.2. Sistema de frens	86
5.4.1.3. Regulació de la càrrega: Variadors de velocitat/freqüència.....	86
5.4.1.4. Altres elements elèctrics.....	87
5.4.1.5. Connexió a la xarxa.....	88
5.4.1.6. Controlador	89
6. VALORACIÓ ENERGÈTICA	91
6.1.1. Capacitat d'emmagatzematge de la central i potència absorbida i entregada.	91
6.1.2. Règims de màxima potència absorbida i entregada	93
6.1.3. Règim d'absorció o entrega constant de potència	95
6.1.4. Règim d'absorció o entrega constant parcial de potència	99
6.1.5. Rendiment total de la instal·lació i densitat energètica.....	101
6.1.6. Temps de vida i cicles d'operació	102
6.1.7. Comparativa energètica amb altres formes d'emmagatzematge d'energia...	103

7. VALORACIÓ ECONÒMICA	105
7.1.1. Cost d'inversió: Disseny i construcció de la central.....	105
7.1.2. Pressupost i inversió inicial requerida	106
7.1.3. Costos d'operació i manteniment.....	109
7.1.4. Beneficis econòmics previstos	109
7.1.5. Estimació temporal de recuperació de la inversió: Flux acumulat, VAN, TIR i Payback.....	110
7.1.6. Comparació amb altres alternatives d'emmagatzematge d'energia.....	113
8. IMPACTE ENERGÈTIC, AMBIENTAL I SOCIAL	115
8.1. Impacte energètic	115
8.2. Impacte ambiental.....	116
CONCLUSIONS	119
BIBLIOGRAFIA	122
Referències bibliogràfiques	122

1. Prefaci

1.1. Motivació

Des de ben petit m'he considerat una persona molt conscienciada sobre el futur de la nostra espècie i el nostre planeta. Com moltes persones de la meva generació, hem viscut una època daurada del progrés tecnològic, que ha modificat per complet les nostres vides, encara que aquest progrés ha tingut un sabor agredolç: s'ha demostrat que, a mesura que les societats humanes es desenvolupen i per consegüent consumeixen més energia i recursos, el nostre planeta pateix una degradació pràcticament irreversible, que afecta la resta d'éssers vius i, com no podia ser d'una altra manera, a nosaltres mateixos.

Després de superar el Grau d'Enginyeria en Tecnologies Industrials i participar en el posterior Màster d'Enginyeria en Tecnologies Industrials amb especialització en Energia, vull posar en pràctica el coneixement transversal del món de l'enginyeria que he rebut i les meves motivacions ambientalment conservadores per a fer el disseny d'una central d'emmagatzematge energètic amb unes característiques concretes, respectuosa amb el medi ambient i possible companya inseparable de la generació amb fonts renovables.

2. Introducció

Com és ben sabut i documentat, el canvi climàtic està avançant en el nostre planeta, portant amb si multitud de problemes ambientals, que ja no només afecten al clima, la fauna i la flora de cada indret, sinó que està afectant a la salut i al desenvolupament de les societats humanes, i tots els indicadors mostren que aquesta tendència no parará d'augmentar en els pròxims anys, fins que no arribem a un punt d'inflexió quan arribem a la total descarbonització de les nostres economies, i s'impulsin models polítics i econòmics que reverteixin aquesta terrible situació i mantinguin els canvis necessaris.

Aquesta dinàmica està portant els principals governs, institucions i empreses dels països més industrialitzats a realitzar una busca i una millora contínues dels sistemes de generació d'energia, tradicionalment molt dependents de l'energia no renovable, per tal de fer una transició cap a una economia més sostenible i a l'aturada completa en el consum d'energies generades a partir de la crema de combustibles fòssils, causants de l'alliberament de la majoria dels gasos que estan perjudicant l'atmosfera del nostre planeta i a tota la biosfera, que es troba totalment immersa en aquesta.

En el cas dels països menys desenvolupats, que es troben ara en plena industrialització, les opcions per transicionar cap a una economia més sostenibles són encara menys factibles, ja sigui per la falta de medis tecnològics, falta de recursos o climatologia severa.

Tot i així, hi ha multitud d'inconvenients en la transició cap a un model energètic més sostenible. Fins al moment que no s'obtingui la fusió controlada de l'hidrogen en un reactor o es retorni a un model de generació nuclear segura (aquest cop de 4a generació [2]), la producció d'energia a gran escala s'haurà d'obtenir, principalment, de grans parcs eòlics o granges solars. Aquest tipus d'instal·lacions no s'adapten a la demanda energètica de cada moment dels consumidors, sinó que generen energia en funció de la velocitat del vent o la irradiació solar de l'indret on estan instal·lats, paràmetres molt variables durant les hores del dia i en dies diferents, pel que se les considera no gestionables. Tot això comporta una intermitència en la generació d'energia elèctrica, amb hores de generació pic i hores de generació pràcticament nul·la o vall, que impedeix assegurar un subministrament estable i continu a la xarxa.

Veiem doncs que el gran problema que comporten les energies renovables és precisament la indisponibilitat d'aquesta energia durant totes les hores del dia i la nit. La solució a aquesta problemàtica passa per l'acumulació de l'energia en sistemes capaços de conservar-la un temps determinat, i que puguin subministrar-la d'una manera senzilla i eficient en el moment que es requereixi. Principalment, hi ha tres tipus d'emmagatzematge d'energia: mecànic, elèctric i químic.

Les mencionades formes d'emmagatzematge d'energia tenen problemes i factors adversos que han fet incrementar l'interès cap aquest tipus de tecnologies. Les bateries de ió liti, encara que cada any es fan més eficients i augmenten la seva capacitat, no tenen una resposta prou potent com per a alimentar grans consums durant estones prolongades, i la seva fabricació involucra elements rars tals com el liti, que en el seu 85% es troba en reserves a Sud-Amèrica [3]. La seva extracció i procés no són innocus pel planeta, i perjudiquen i pertorben la salut de les persones que es troben pròximes als jaciments, comportant inclús conflictes internacionals per a la seva possessió, com ha passat sempre que un material era molt necessari pel moment tecnològic mundial. Amb l'aparició de l'hidrogen com a eficaç acumulador energètic, molt més fàcil d'accedir per tots els països, és bastant probable que el futur de l'emmagatzematge i transport de petites quantitats d'energia, tals com les necessàries per a fer circular un vehicle particular, tendiran a emprar aquesta tecnologia, i el liti quedarà relegat a un segon pla.

En el cas de l'emmagatzematge massiu d'energia per al seu posterior consum, pel moment l'única solució viable de la que es disposa són les centrals hidroelèctriques reversibles o de bombeig. Les seves avantatges són nombroses: capacitat enorme d'emmagatzematge d'energia, disponibilitat quasi immediata i adaptació en temps real al consum de la xarxa. Paral·lelament, però, aquesta tecnologia també té seriosos inconvenients, que moltes vegades són impossibles de superar: destrucció d'ecosistemes sencers, inversions inicials molts cops inassumibles per a moltes economies, indisponibilitat de l'aigua, climes massa càlids o freds, sequeres (que cada cop seran més abundants), etc. És per aquests motius que varies start-ups i grans empreses del sector energètic de tot el món s'han bolcat en buscar noves maneres d'emmagatzemar l'energia utilitzant el mateix principi fonamental.

Dins d'aquestes noves tecnologies es troben els sistemes d'emmagatzematge d'energia potencial a través de blocs sòlids, substituint el tradicional paper de l'aigua com a element emmagatzemador per masses sòlides que es desplacen verticalment. En aquest treball es presentaran els projectes més atractius en aquest camp, i es dimensionarà i compararà una instal·lació basada en aquesta tecnologia per a establir una primera referència de la situació i potencial d'aquests sistemes en el panorama energètic mundial.

2.1. Objectius del projecte

Aquest projecte té dos objectius principals: dimensionar i definir les característiques principals

d'una instal·lació basada en la tecnologia de l'emmagatzematge d'energia en forma de blocs sòlids i analitzar i establir la seva posició, mitjançant els principals indicadors energètics i econòmics, dins el panorama de l'emmagatzematge d'energia actual.

Tanmateix aquests objectius comporten una sèrie de tasques prèvies i secundàries: primer, conèixer i entendre els diversos factors i paràmetres que influeixen en el dimensionament i funcionament d'una central de les característiques descrites, ja que a través d'aquest primer anàlisi es prendran les referències per a fer un disseny realista i adequat; segon, plantejar una instal·lació concreta a partir de la qual fer l'anàlisi de les possibilitats que es brinden així com entendre l'abast i les oportunitats que presenta; tercer, comparar els resultats amb la informació presentada per l'empresa de referència així com amb la d'altres sistemes d'emmagatzematge d'energia i, per últim, fer una valoració econòmica i ambiental del sistema proposat, a partir de la qual extreure les conclusions i acotar les possibilitats de la tecnologia.



Figura 2.1: Prototip de central d'emmagatzematge d'energia potencial, Ginebra, Suïssa. Font: web Energy Vault.

2.2. Abast del projecte

Tot i que a priori es tracta d'un projecte molt captivador, existeix una certa desconfiança sobre

el seu possible funcionament, ja que el projecte ha rebut inversions importants però encara no es troba operatiu a cap lloc del món. L'agost del 2020 es va acabar de construir el primer prototip a Ginebra, que hauria d'entrar en operació d'aquí pocs mesos per tal de fer una valoració experimental del seu rendiment.

Degut a la falta d'informació, nivell mínim de maduresa de la tecnologia i les pròpies limitacions d'aquest projecte, s'ha buscat en tot moment la simplicitat en els càlculs i el llenguatge emprat, per a fer accessible aquest document a qualsevol persona relacionada amb el món tècnic. Tampoc s'ha entrat en detall en multitud de qüestions que, en cas de portar la instal·lació a la pràctica, s'haurien d'estudiar àmpliament i el desenvolupament de les quals es podria considerar com un projecte sencer.

3. L'emmagatzematge d'energia

Degut al canvi en el model de generació energètica, les xarxes elèctriques s'enfronten avui dia a una evolució sense precedents, tant en la producció com en el consum, que requereix una gestió òptima. Aquesta evolució dels seus elements de gestió ha de permetre una major diversificació de fonts d'energia, incloent la intermitència de les renovables, així com una major fluctuació en la demanda, els canvis de la qual tenen cada cop més efectes sobre l'estabilitat de la xarxa.

La introducció dels elements d'emmagatzematge d'energia possibilita l'acumulació d'energia durant el temps en que la producció excedeix el consum. La quantitat emmagatzemada és utilitzada quan el consum excedeix la producció i permet mantenir les capacitats productives a un nivell constant, o com a mínim amb variacions més pausades. Això permet un increment en l'eficiència, una reducció de costos, una major fiabilitat de gestió de la planta i un augment de la seva vida mitja.

La inclusió d'aquests tipus d'elements té un impacte positiu a diferents nivells, des del consum de ciutats senceres a consums d'habitatges aïllats. Tanmateix, aquesta àmplia gama d'aplicacions fa que les tecnologies actuals d'emmagatzematge es classifiquin segons la seva aplicació. Es poden classificar en sistemes d'emmagatzematge a gran escala (de l'ordre de MW), de mitjana escala (de l'ordre de MW) i de petita escala (de l'ordre de kW) [4].

L'emmagatzematge d'energia proporciona serveis essencials durant tota la cadena de valor de l'energia, i dona suport a la transició cap a un model energètic més segur, competitiu i amb una menor petjada de carboni. La disponibilitat dels sistemes d'energia permet assegurar un correcte balanç entre la demanda i el consum, una millor gestió de les xarxes de transmissió i distribució i una millora de la competitivitat i seguretat de la xarxa elèctrica.

3.1. Sistemes d'emmagatzematge d'energia

Un sistema d'emmagatzematge d'energia es defineix com aquell sistema o dispositiu empleat per a emmagatzemar energia per al seu ús posterior, ja sigui a curt o a llarg termini, de forma intensiva o mantinguda en el temps. Aquests sistemes es diferencien en funció del tipus de mecanisme que permet emmagatzemar i alliberar l'energia.

Actualment, els seus principals mecanismes són:

- Energia mecànica: en forma d'energia potencial (p.e: centrals d'hidrobombeg),

energia cinètica (p.e: volants d'inèrcia) o energia elàstica (p.e: CAES).

- Energia química: a través de la combustió de molècules de baixa energia d'enllaç (gasolines, alcohols, hidrogen, etc.)
- Energia electroquímica: associada als processos d'oxidació/reducció mitjançant cel·les electroquímiques que permeten transformar-la en energia elèctrica (p.e: bateries, piles).
- Energia electromagnètica: obtinguda en una regió atribuïda a la presència d'un camp electromagnètic.
- Energia tèrmica: associada a la capacitat d'acumulació de determinats materials en les seves calors específiques i/o les seves calors latents de canvi de fase.

El present projecte s'enfocarà a l'emmagatzematge d'energia cinètica en la seva forma potencial, ja que és la tipologia de la instal·lació analitzada.

3.2. Introducció als sistemes d'emmagatzematge d'energia potencial

L'energia potencial és l'energia mecànica associada a la posició d'un cos dins d'un camp de força (gravitatòria, electrostàtica, etc.). L'energia potencial d'un cos és una conseqüència de que el sistema de forces que actua sobre ell és conservatiu, cosa que significa que la suma de l'energia cinètica i l'energia potencial del cos és constant. Independentment de la força que la origini, l'energia potencial que posseeix el sistema físic representa l'energia emmagatzemada en virtut de la seva posició i configuració, per contraposició a l'energia cinètica, que representa la seva energia associada al moviment. Veiem l'equació:

$$W = \Delta E_c + \Delta E_p$$

Sent:

- W el treball, mesurat en Joules [J]
- ΔE_c l'increment d'energia cinètica [J]
- ΔE_p l'increment d'energia potencial [J]

La noció d'energia potencial es relaciona amb el treball (W) realitzat per les forces sobre el sistema físic per a traslladar-lo d'una posició a una altra de l'espai. Si el treball no depèn del camí seguit i es parteix d'una posició en repòs i s'acaba en una altra també en repòs ($\Delta E_c = 0$), llavors el treball W expressa la diferència d'energia potencial $E_{pa} - E_{pb}$ del sistema entre la posició de partida A i la posició d'arribada B. Recordem l'expressió que determina el treball realitzat entre dues posicions o configuracions:

$$W_{AB} = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{l} = E_{pb} - E_{pa}$$

En el cas de l'energia potencial gravitatòria, aquesta es defineix com l'energia que tenen els cossos pel fet de posseir massa i estar situats a una certa distància mútua. Entre les masses de grans magnituds s'exerceixen forces d'atracció, de major intensitat com més grans són les masses. Els planetes creen un camp de força gravitatori que actua sobre les masses menors que estan pròximes a ells, donant com a resultat el fenomen de la gravetat.

L'energia potencial que posseeix una massa m situada a una altura h sobre la superfície terrestre equival a:

$$E_p = m \cdot g \cdot h$$

Per tant, l'energia que hauríem de vèncer per moure un objecte entre dues altures, o sigui que quedaria emmagatzemada, es defineix com:

$$\Delta E_p = E_{pb} - E_{pa} = m \cdot g \cdot (h_b - h_a)$$

Si volem aconseguir la potència que s'hauria de subministrar, o per contra, que podria lliurar el sistema, hem de dividir el treball entre el temps que es triga a realitzar tot el moviment:

$$P = \frac{W}{dt} = \frac{\Delta E_p}{t_1 - t_0} = \frac{m \cdot g \cdot (h_b - h_a)}{t} = m \cdot g \cdot v$$

Per tant, la potència lliurada dependrà directament de la velocitat de moviment de les càrregues.

Els sistemes d'emmagatzematge d'energia en forma d'energia potencial, tals com les existents centrals de bombeig, utilitzen aquest principi fonamental de la física per tal d'emmagatzemar-hi l'energia elèctrica sobrant present en la xarxa, mitjançant la seva conversió electromecànica. Posteriorment, en cas de necessitar-ho, la xarxa pot recuperar aquesta energia realitzant la conversió inversament.

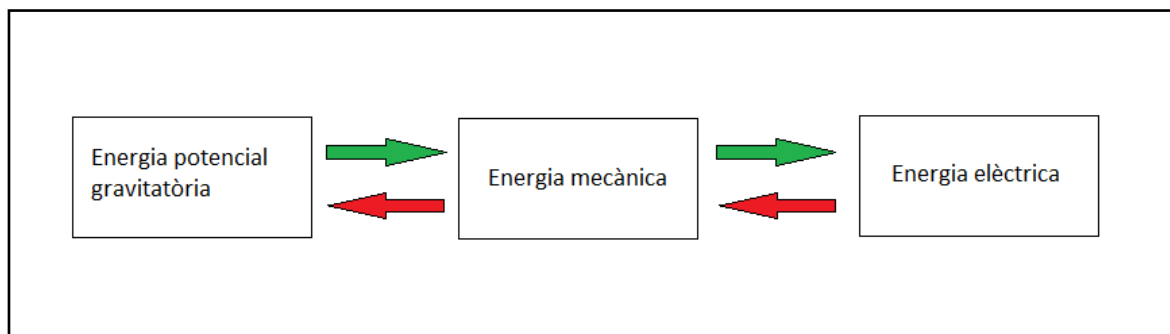


Figura 3.1: Diagrama de les transformacions energètiques en un sistema d'emmagatzematge potencial. Font: propi.

L'energia doncs, recorreria el següent camí energètic, en una direcció quan carrega (consumeix la potència sobrant) i en una altra quan descarrega (subministra la potència demandada). Cadascuna de les transformacions energètiques tindrà associat un rendiment, que haurà de ser tingut en compte a l'hora de valorar la capacitat de la instal·lació de retornar el màxim del que s'hagi emmagatzemat.

3.2.1. Centrals hidroelèctriques de bombeig

Les centrals hidroelèctriques reversibles es destaquen com un dels mètodes més àmpliament acceptats d'emmagatzematge energètic. En els instants en que hi ha una menor demanda d'electricitat, l'excés s'utilitza per a bombejar aigua des d'un embassament inferior cap a un embassament superior. Quan arriba el moment de màxima demanda, es permet que l'aigua prèviament bombejada flueixi a través d'un sistema amb de turbina de generació d'electricitat. El sistema de central hidroelèctrica reversible funciona com un sistema de bombeig en temps de poca activitat i com a turbina en temps d'alta demanda.

Hi ha múltiples exemples de centrals d'aquestes característiques en tot el món, sent la de més capacitat la central de Bath County, a Virginia, Estats Units [5]. Aquesta central compta amb una capacitat de producció de 3000 MW.

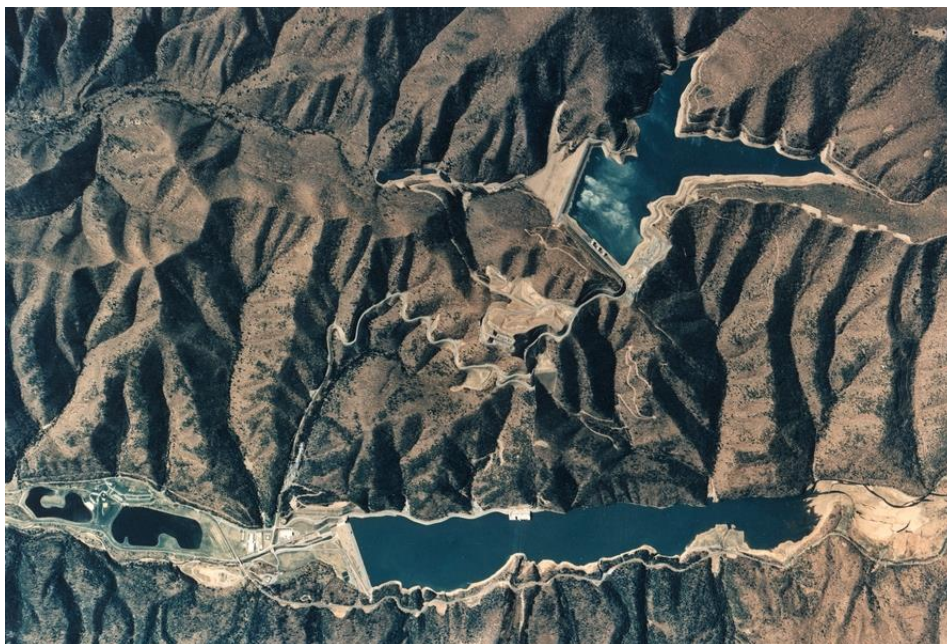


Figura 3.2: Imatge aèria dels dos nivells de la central d'hidrobombeig de Bath County, Estats Units. Font: elperiodicodelaenergia.com

Encara que no tant conegudes, aquestes centrals també tenen presència en el territori espanyol. Les centrals de la Muela I i la Muela II a València són el cas més conegut. Tanmateix, la recent aprovació del projecte de la central hidroelèctrica reversible de Riba Roja [6] significarà la construcció de la central d'hidrobombeig més gran d'Europa en territori català, ja que comptarà pràcticament amb una capacitat assimilable a la central de Bath County.

Encara que les centrals d'hidrobombeig ja són una tecnologia prou madura i gaudeixen de grans prestacions energètiques, també comporten una multitud de problemes i no es poden construir a qualsevol indret. Requereixen grans inversions, poden arribar a inundar grans extensions de terreny (afectant ecosistemes sencers) i són totalment dependents dels recursos hídrics de cada zona.

3.2.2. Noves propostes d'emmagatzematge d'energia potencial

És per això que últimament han aparegut noves solucions que utilitzen el mateix principi d'acumulació d'energia en massa, substituint l'aigua per elements més pesants i en forma sòlida. En són un exemple les següents propostes:

Sistema ARES (Advanced Rail Energy Storage)

L'empresa estatunidenca ARES North America [7] va proposar un sistema d'emmagatzematge d'energia a través de vagonetes carregades de materials pesants, tals com roques i formigó, amb una massa total d'aproximadament 230 tones, que operen

experimentalment a l'Estat de Nevada, en un terreny amb cert desnivell, i recorren uns 8 km de vies pujant i baixant un turó.

Amb un desnivell de 900 m en vertical, quan la generació d'energia excedeix el consum, es fan pujar les vagonetes. Un cop a dalt, es mantenen estacionades fins que es produeix un requeriment d'energia, moment en que es fan descendir, i es transforma l'energia potencial acumulada en energia elèctrica. El sistema, tal com s'ha dissenyat, permet cedir a la xarxa potències de l'ordre de 200 MW i té un rendiment de cycle del 80%.

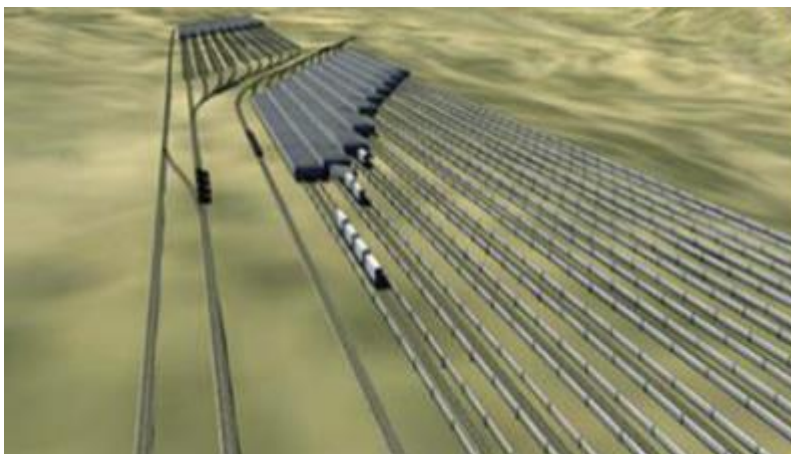


Figura 3.3. Model de la proposta de ARES North America. Font: aresnorthamerica.com.

Proposta de l'empresa Gravitricity

La proposta d'emmagatzematge d'energia d'aquesta empresa escocesa [8] és força senzill: emmagatzemar l'energia en grans blocs subterranis, que es poden moure centenars de metres en el recorregut de mines abandonades. Les masses, de pesos entre 500 i 5.000 tones, s'han de moure a raó de centímetres per a generar outputs de la magnitud de MW.

Un dels altres grans avantatges d'aquesta tecnologia és la velocitat de resposta que es podria donar als requeriments energètics. Actualment, estan construint un prototip de 250 kW a Escòcia, i tenen planejat arribar a nivell comercial l'any 2023. El seus principals clients serien europeus, sud-africans i americans, zones de gran tradició minera i que disposen del tipus d'espai que requereix aquesta instal·lació.

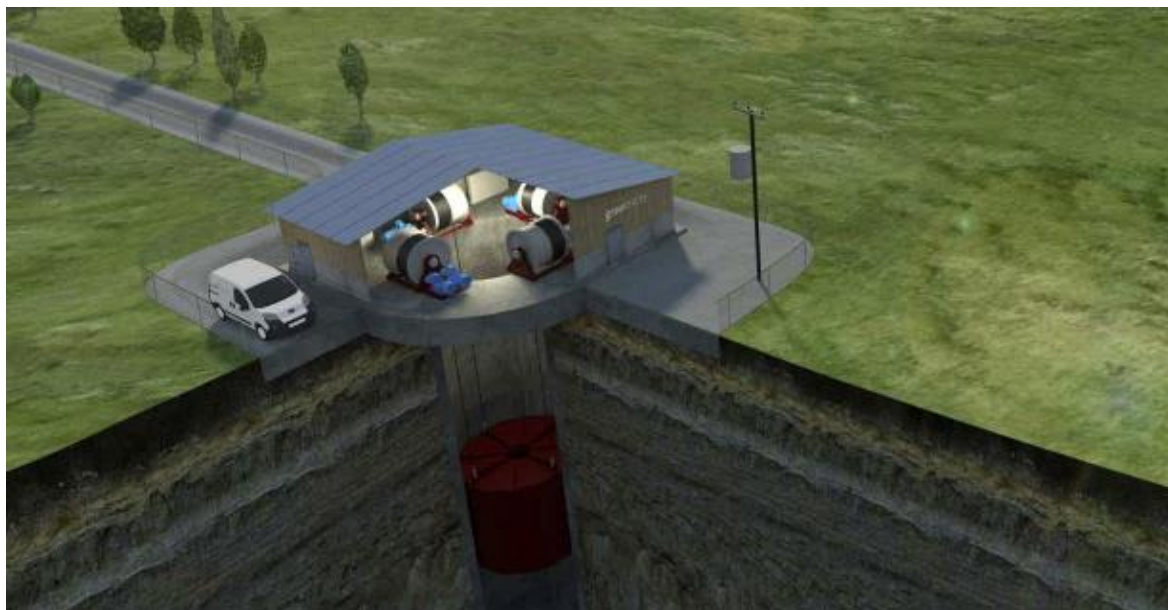


Figura 3.4. Model de la proposta de Gravitricity. Font: gravitricity.com.

Proposta de l'empresa Gravity Power

Retornant a la idea de la central hidroelèctrica de bombeig, l'empresa Gravity Power [9] ha elaborat una proposta arriscada: bombejar aigües subterrànies per a elevar un pistó d'enormes dimensions, que en deixar-se caure provocaria la pujada de l'aigua que passaria per una turbina per a generar electricitat.

La seva principal avantatja respecte a les centrals hidroelèctriques convencionals seria la no necessitat de una gran reserva oberta, ja que s'aconseguirien potències similars utilitzant molt menys espai. El CEO de l'empresa assegura que es podria aconseguir una planta de 400 MW de generació elèctrica durant 16 hores a través d'un pistó de 8 milions de tones. Encara que sembli un pes exagerat, diuen que amb les actuals capacitats de bombeig és possible aconseguir aquests resultats.

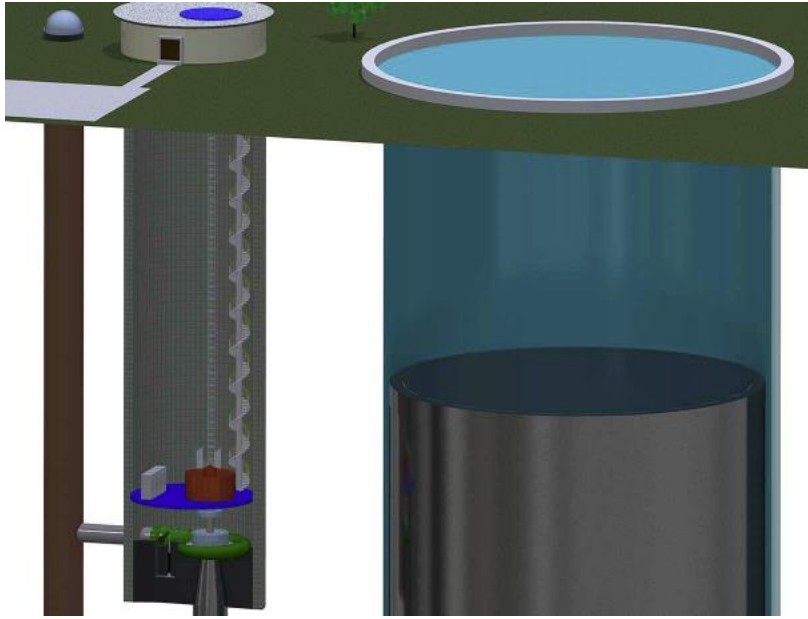


Figura 3.5. Model de la proposta de Gravity Power. Font: gravitypower.net.

3.3. La proposta de Energy Vault

Energy Vault [10] és una empresa fundada i establerta a Suïssa, especialitzada en sistemes d'emmagatzematge cinètic i potencial d'energia de llarga duració. Va ser fundada el 2017 per Bill Gross, gerent i CEO de Idealab, un estudi suís d'start-ups, així com per els seu cofundadors Andrea Pedretti (CTO) i Robert Piconi (CEO).

Durant el 2018 i 2019 va rebre importants inversions de part de NeoTribe Ventures, Cemex i SoftBank Vision Fund [11]. L'any 2020, va ser nominada *Named Technology Pioneer* pel Fòrum Econòmic Mundial, ja que ofereix una solució econòmica d'emmagatzematge d'energia neta i subministrament de potència útil.

El seu producte principal es basa en una grua multicapçal que emmagatzema l'energia mitjançant l'acumulació en altura de blocs pesants, fabricats amb materials compostos reciclats, construint així una torre que captura l'energia potencial a través del guany per elevació dels blocs.



Figura 3.6. Model del prototip de central d'emmagatzematge d'energia potencial. Font: energyvault.com.

La proposta d'Energy Vault assegura que és, actualment, l'únic sistema basat en emmagatzematge d'energia potencial amb utilitat comercial que no depèn de la topografia o geografia subterrània específica de cada zona. A més a més, presenta uns costos de construcció, operació i manteniment molt econòmics, presentant-se així com d'especial interès per a les zones del planeta que estan en desenvolupament però que volen fer el salt cap a l'electrificació i la generació i emmagatzematge d'energia de forma respectuosa amb el medi ambient.

Les seves principals característiques són la possibilitat de subministrar potència útil suficient com per alimentar consums mitjans i alts durant un temps considerable (molt superior al que es podria obtenir a partir de bateries químiques), oferir una solució molt més sostenible de cara a l'obtenció dels materials i no degradar-se durant la seva vida útil, mantenint un rendiment d'operació del 80-90% [10]. Tenint tot això en compte, i també el seu relativament baix cost de construcció i instal·lació, asseguren que es pot subministrar el kWh a un preu competitiu.

Tot això requerint una inversió inicial molt per sota del que costaria econòmicament i ambientalment fer una central d'hidrobombeig, que ronda el miler de milions d'euros. Asseguren també que la seva innovadora solució permet a les energies renovables oferir potència elèctrica les 24 h del dia a la xarxa per menys cost que les energies provinents de combustibles fòssils, si es combina la torre d'emmagatzematge amb plantes solars o eòliques low-cost, fins al punt de superar el cost d'operació de les centrals de cycle de gas combinat [10].

A més a més, a través de la construcció dels blocs amb materials reciclats compostos, el cost

ambiental de la torre, sobretot si el comparem amb el cost ambiental de les centrals d'hidrobombeig típiques, és pràcticament nul.

Per altra banda, per tal de fer funcionar un sistema tant complex com el proposat, l'empresa ha desenvolupat un disseny propi que funciona a través d'un complex software de control que permet ubicar els blocs amb molta precisió, tant al nivell inferior com al superior. El sistema de control compta amb càmeres als capçals per tal d'identificar en tot moment els blocs transportats així com la ubicació d'origen i destí.

Per últim, l'empresa suïssa explica que els seus models són modulars i escalables depenent de la quantitat d'energia demandada per a cada aplicació.

4. Pre-disseny de la central d'emmagatzematge d'energia potencial

4.1. Anàlisi de les avantatges i deficiències del model proposat per Energy Vault

Després de realitzar un minuciós anàlisi del prototip proposat per l'empresa Energy Vault, es conclou que el model presenta característiques molt interessants però alhora destapa algunes inconsistències tècniques que caldrà repensar per tal de concebre un model factible de central d'emmagatzematge.

Les característiques més interessants es recullen en la següent llista:

- Principi de funcionament: tot fa pensar que el funcionament plantejat és factible, encara que caldrà comprovar en més detall si els resultats obtinguts són realistes o estan sobrevalorats.
- Funcionament amb 3 braços dobles (6 càrregues): degut a la naturalesa no contínua de les operacions, sembla imprescindible disposar d'aquest número de capçals per a poder donar una resposta estable als requeriments energètics de la xarxa.
- Ús doble dels blocs: per a emmagatzemar energia i per a servir com a base dels pisos emmagatzemats al seu damunt. Caldrà vigilar que la càrrega que hauran de suportar per unitat de superfície no excedeixi les capacitats constructives a compressió dels elements.

A continuació es presenten una sèrie de problemes, inconsistències i incongruències que té el model de l'empresa, a través de l'anàlisi dels quals s'elaboraran les directrius per a generar un prototip propi, que s'adapti millor a la realitat i pugui tenir un ús més realista, eficient i segur.

- Altura excessiva: el model inicial proposat per l'startup suïssa tenia una alçada similar a la d'un molí eòlic, on els blocs havien de fer desplaçaments verticals que excedien els 120 m. Tenint en compte l'impacte de la força del vent, les deformacions del cable i l'efecte pèndol, tot fa pensar que seria complicat dur a terme totes les operacions de manera segura.
- Blocs inservibles: els pisos situats més a la base de l'anell interior són inservibles, ja que només serveixen com a suport per als pisos superiors. No té sentit energètic desplaçar-los, ja que quedarien a un nivell més alt que el propi en fase de descàrrega.

S'haurà de trobar una nova manera de crear la diferència d'altures entre els nivells.

- Blocs de formigó: la solució es presenta com una alternativa 'verda' a altres solucions d'emmagatzematge d'energia. Per tant, s'haurien de valorar altres vies d'obtenció dels materials requerits per a fer l'emmagatzematge potencial que no formigó de nova generació, ja que aquest material emet grans quantitats de CO₂ durant la seva conformació.

Un cop vistes les principals avantatges i deficiències del model de Energy Vault, es caracteritzen els principals desafiaments tècnics que comportaria l'operació d'una instal·lació com la descrita, per a recopilar informació que serà utilitzada per a la fase de disseny del prototip objecte d'aquest projecte.

4.2. Desafiaments tècnics de rellevància

4.2.1. Disposició dels blocs emmagatzemadors

És de vital importància crear una estructura de blocs tant al nivell superior com a l'inferior que permeti quatre coses:

- reduir al màxim el desplaçament horitzontal dels blocs, part crítica del seu funcionament ja que és on es concentra la major part de pèrdues generades
- reduir els desplaçaments angulars, que també provocaran pèrdues
- crear una correspondència adequada entre el nivell superior i inferior
- minimitzar el risc de mal posicionament dels blocs

Amb aquests fins, s'estudien diverses organitzacions amb avantatges i inconvenients cadascuna.

Finalment, s'opta per fer emmagatzemar els blocs quadriculadament en una sola direcció. Les seves principals avantatges són que minimitza al màxim el risc de caiguda dels blocs, alhora que manté una correspondència adequada entre el nivell superior i l'inferior. A més a més, aprofita eficientment tot l'espai angular del que disposen els braços de la torre. Tanmateix, també presenta certs inconvenients, ja que requereix de girs constants dels capçals (encara

que petits) per a operar correctament, per pràcticament tots els moviments de translació entre els dos nivells. Aquest fet farà que es perdi certa energia, tot i que es considera una mancança acceptable enfront els beneficis que comporta.

4.2.2. Ubicació correcta dels blocs en totes les operacions

El principal desafiament tècnic de la torre serà la disposició correcta en absolutament totes les operacions de moviment dels blocs. Qualsevol desviació o mal posicionament podria tenir conseqüències crítiques, ja que la seguretat estructural del nivell superior de la central va intrínsecament lligada a la posició adequada dels blocs que l'integren.

Per aquest motiu, és imprescindible comptar amb un sistema de posicionament avançat, que sàpiga identificar en tot moment quin bloc està agafant, quina destinació té, i que sigui capaç de corregir possibles perturbacions en el moviment (força del vent, dilatacions tèrmiques, geometria dels blocs, etc.).

En el disseny presentat per Energy Vault, cada capçal compta amb una càmera que pot reconèixer cada bloc i identificar la ubicació real de la posició d'origen així com de destí. S'estima que aquest sistema serà adient per a la instal·lació que es projecta.

A més a més, els blocs que integren el sistema hauran de disposar de sistemes de fixació que els permetin adherir-se correctament amb els blocs contigus en el nivell elevat, per tal de donar més seguretat estructural a la torre i dificultar les caigudes laterals.

4.2.3. Impacte de la força del vent

Com s'ha mencionat a l'últim apartat, la força del vent és segurament l'agent pertorbador més important, ja que depenent de la seva velocitat pot acabar provocant un moviment dels blocs que faci massa perillosa l'operació de la torre. La majoria de grues comercials actuals poden treballar en un rang de velocitats de vent de fins a 45 km/h amb seguretat [12].

Per tant, la central només es podrà operar els dies en que el vent no excedeixi aquest valor, i s'haurà de preveure l'arribada de grans borrasques o ventades amb antelació, per tal de descarregar els blocs al nivell inferior, on l'impacte serà molt menor.

4.2.4. Sobrecàrregues

Tractant-se d'una instal·lació que emmagatzema l'energia a través de grans masses, és imprescindible tenir en compte el propi pes dels blocs sobre els que estiguin situats a sota seu, i no excedir els valors límits de resistència a compressió del material que s'utilitzi, ja que el col·lapse d'un bloc inferior provocaria la caiguda de tots els que estiguessin situats al seu damunt, comprometent la seguretat estructural de la central.

4.2.5. Moviments sísmics

Similarment a l'impacte del vent i les sobrecàrregues, problemes que tindrien un impacte directe en la seguretat estructural de la torre de càrregues, passa el mateix amb el moviments sísmics o terratrèmols. La instal·lació haurà d'estar preparada per a resistir l'impacte de moviments en les plaques tectòniques terrestres, o bé construir-se en zones de baixa intensitat sísmica.

4.2.6. Impacte negatiu en l'entorn

Tal com s'ha vist en la construcció de grans parcs eòlics, les grans instal·lacions provoquen rebuig en sectors de la població, ja que desnaturalitzen el medi i poden trencar l'harmonia paisatgística i afectar als ecosistemes locals. És per aquest motiu que es considera molt important idear una solució que pugui fusionar-se en la mesura del possible a la geografia de l'indret on s'hagi de construir, buscant alternatives constructives i visuals que resultin atractives.

4.3. Modelatge inicial de la central d'emmagatzematge d'energia potencial

4.3.1. Objectius

Tenint en compte les avantatges i inconvenients mencionats, s'estima convenient idear un nou model de torre d'emmagatzematge d'energia potencial que s'adapti més adequadament a les capacitats tècniques i necessitats energètiques actuals.

Primerament, es marquen unes directrius per a fer el modelatge, que el model haurà de satisfer conjuntament. Aquestes es poden englobar en:

- 1- Màxim aprofitament de l'energia, és a dir, màxim rendiment possible
- 2- Màxima capacitat d'emmagatzematge
- 3- Mínim impacte ambiental
- 4- Màxima seguretat

- 5- Mínim manteniment
- 6- Mínim cost
- 7- Utilització d'equipament disponible al mercat

En els següents apartats es valora i pre-dimensiona detalladament cada component que integrarà el model proposat.

4.3.2. Disposició i tipus de materials per ser utilitzats com a element emmagatzemador

En el projecte d'Energy Vault, per a fabricar els elements que servien com a emmagatzemadors d'energia s'empraven blocs de formigó, amb una geometria rectangular i amb una altura major que amplada. Com s'ha comentat anteriorment, aquest disseny presenta una sèrie d'inconvenients, principalment un cost ambiental elevat ja que s'utilitzen grans quantitats de formigó i la construcció d'una estructura amb certa inestabilitat, que podria donar lloc a accidents relacionats amb l'operació de la instal·lació i l'impacte de la força del vent.

Una possibilitat seria crear un nou disseny bàsic dels blocs que garanteixi una major seguretat estructural a la torre. Aquest disseny ha d'emfatitzar en la facilitat del transport vertical i la col·locació adequada i segura de l'element tant en el nivell superior com en el nivell inferior de la torre.

Observant els vaixells de càrrega de contenidors, vaixells especialitzats en el transport de grans masses, així com els molls de descàrrega dels ports, veiem que la distribució més segura en altura és col·locant els contenidors amb el costat més llarg disposat horitzontalment. Aquesta disposició confereix una major estabilitat davant les forces d'acció de les ones del mar, que col·lideixen constantment contra el casc dels vaixells. Fent un símil amb això, es pot concloure que també seria més adequat disposar els elements emmagatzemadors d'energia potencial amb la seva cara més llarga recolzada horitzontalment, per tal de minimitzar la força de l'impacte del vent i incrementar l'estabilitat estructural.

Per altra banda, encara que una disposició en horitzontal maximitza la seguretat de la instal·lació i l'estabilitat de la torre, també fa que augmenti el fregament amb l'aire durant el transport dels elements potencials entre el nivell superior i l'inferior. Tot i així, no s'estima que les pèrdues per aquest fregament repercuteixin de manera significativa en el rendiment de la instal·lació.

4.3.3. Torres grua

En aquest apartat s'explicaran detalladament les torres grua que s'hauran d'emprar en el projecte, les seves parts i les seves característiques.

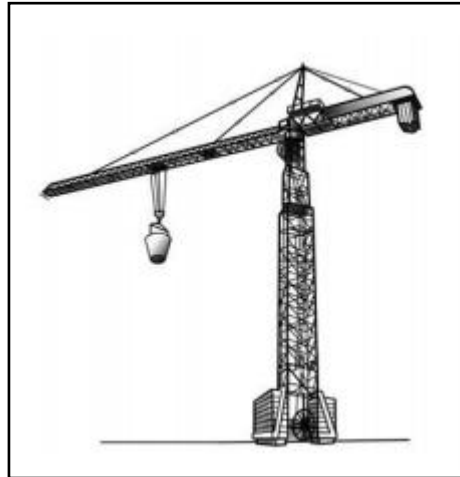


Figura 4.1. Model bàsic de torre grua. Font: Grúas, Antonio Miravete.

La torre grua és un mecanisme empleat en la construcció per a elevació i descens de càrregues, de funcionament discontinu, destinades a distribuir en el seu radi d'acció les càrregues necessàries. Principalment, estan conformades per una ploma orientable sobre un suport giratori muntat sobre una base que és una torre metàl·lica. Poden ser fixes o mòbils, en el projecte s'utilitzaran grues fixes [13].

La torre grua fixa és una grua la base de la qual no té la capacitat de fer moviments de translació, o bé que disposa dels mecanisme necessaris per a fer-la però no poden ser utilitzats en l'emplaçament, tal com passa en el present projecte, on la torre grua central serà estacionària. Aquest tipus de grues asseguren la seva fixació mitjançant dos tipus de bases:

- Recolzades , utilitzen un contrapès per a fixar la seva base
- Encastades, utilitzen els primers trams de grua per a ser encofrades en formigó en una sabata o amb mètodes semblants

Són un tipus de torre grua molt empleada degut al seu baix cost en comparació amb d'altres tipus més sofisticats i les seves capacitats de càrrega.

En els següents apartats es definiran les característiques de la torre grua objecte de disseny, és a dir, ens centrarem en les característiques més específiques que s'hauran de tenir en

compte per al disseny de la central, així com l'altura a la que es vol treballar, la càrrega de treball, el temps de vida esperat i altres aspectes d'importància.

Les torres grua estan compostades per les següents parts:

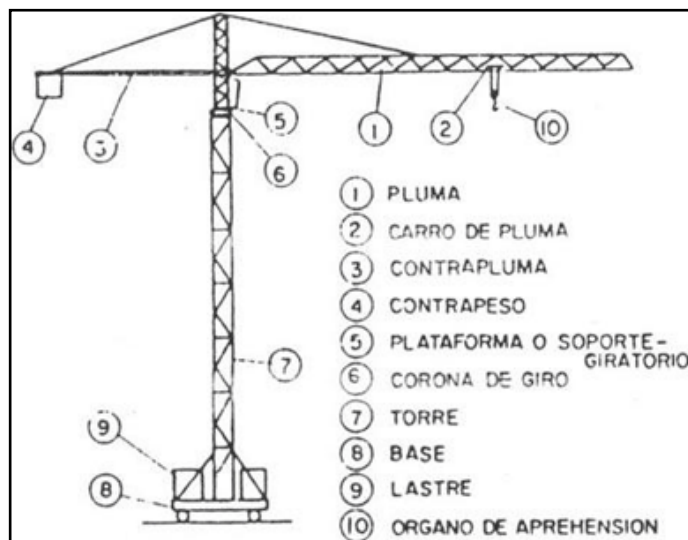


Figura 4.2. Parts principals d'una torre grua. Font: Grúas, Antonio Miravete.

Dimensions

Entre les dimensions que defineixen una torre grua, la més important serà l'altura de servei, és a dir, l'altura màxima a la que serà capaç d'operar la torre grua. L'altura pot variar segons el disseny, encara que es recomana no excedir els 80 m de màxim desplaçament vertical [15], ja que es dificulta el control de la posició de la càrrega, paràmetre imprescindible per a operar amb seguretat la central.

L'estructura central de suport, que serà compartida per les 3 plomes que s'instal·laran en la seva part superior, haurà d'estar dimensionada per a suportar la càrrega de màxim funcionament, és a dir, de 6 càrregues simultànies, així com el pes propi de la instal·lació i dels components allotjats a les cabines centrals dels braços.

Una altra dimensió molt rellevant de cara al disseny serà la longitud màxima de ploma, que indicarà la màxima distància a la que es podrà situar una càrrega en el braç de la torre grua. En el present treball, s'estima que per a poder dissenyar una correspondència adequada entre els nivells superior i inferior alhora que no s'excedeix una distància que provoqui un moment flector excessiu en el braç, s'hauria de poder arribar al voltant de 40 m [15].

Plomes

Els 3 braços que operaran la instal·lació seran dobles, per tant, tindran dues plomes (en

comptes del típic muntatge de ploma i contraploma). Aquestes estaran constituïdes pels mòduls bàsics de cada fabricant, i es dimensionaran per la distància màxima horitzontal respecte l'eix central de la càrrega.

Cables

Els cables seran l'element encarregat de transmetre els moviments d'elevació del capçal i de translació de la càrrega, per tant dividirem els cables segons el seu ús i definirem cadascun en funció de les màximes sol·licitacions que rebri.

Els cables utilitzats normalment en instal·lacions de torres grua són metàl·lics, i els podem trobar tant per l'elevació com per la translació. Aquests cables estan compostats per filferros que formen cordons, que, enrotllats sobre una ànima, acaben format el cab.

Tirants

Els tirants són elements encarregats d'aguantar la ploma i la contraploma (en el cas actual, doble ploma). Poden ser de dos tipus, de cables o bé de barres d'acer unides mitjançant bulons.



Figura 4.3. Conjunt de tirants utilitzats en una torre grua. Font: gruasyequiposgarcia.com.

Motors

Les grues poden disposar de diversos motors en funció dels moviments que puguin realitzar. Els motors elèctrics empleats en aquest tipus de maquinària són trifàsics asíncrons d'anells rodants o de gàbia d'esquirol (encara que en algun cas s'utilitzen motors de corrent continu).

Es detallaran i dimensionaran en l'apartat 6.4 Disseny de les instal·lacions elèctriques, ja que abans es necessita conèixer quina capacitat energètica mecànica tindrà la central.

Frens

En el sistema de translació horitzontal i en l'elevació o descens de la càrrega, és necessari l'ús de frens per a fer l'aturada del moviment. En el cas de les grues el fre actua quan es deixa d'alimentar elèctricament el motor, per condicions de seguretat, això es fa a través d'un ressort, que fa reaccionar el mecanisme de fre quan hi ha o deixa d'haver-hi tensió.

Hi ha diversos tipus de frens: de cinta, de mordassa, de disc i cònic. En el projecte actual, seria una bona opció emprar frens cònics, interiors al propi motor, que actuen sobre el rotor quan deixa d'haver-hi tensió i el ressort empeny el fre. Aquests frens i els motors formaran un conjunt.



Figura 4.4. Frens de mordassa emprats per a frenar el rotor. Font: <https://www.seipee.it>.

amb una càrrega d'aproximadament 30 tn. Això equivaldria a un moment flector de l'ordre de 12000 kN·m.

Capçals

Els capçals seran l'element encarregat d'agafar els contenidors, es troben situats a la part més baixa del cable que es despenja de la ploma i, en la instal·lació actual, tindran el següent aspecte:

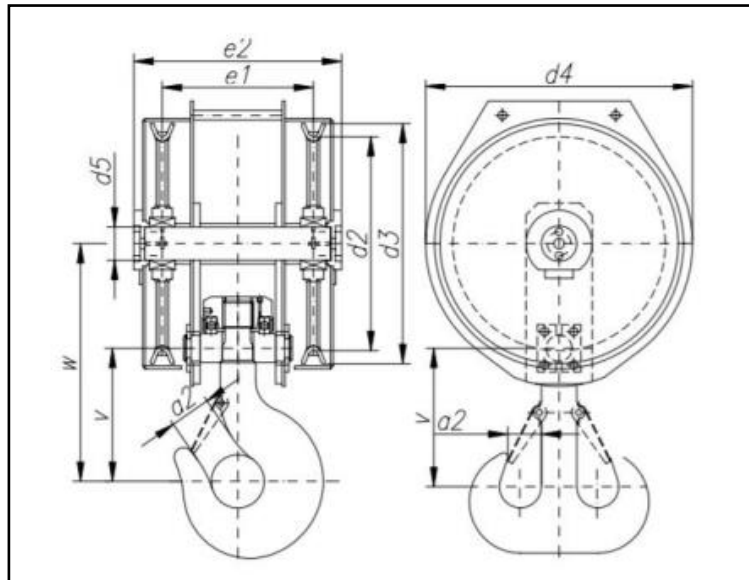


Figura 4.5. Aspecte i principals paràmetres característics d'un capçal de doble acció. Font: Grúas, Antonio Miravete.

Carro

És l'element que recorre la ploma i s'encarregarà de situar la càrrega a la seva longitud de treball. Durant la càrrega farà desplaçaments de fora cap a l'eix central, un cop finalitzat el moviment d'elevació, i durant la descàrrega s'encarregarà d'allunyar la càrrega per a situar-la sobre la seva posició de descans en el pis inferior, combinant el motor de translació i el motor de rotació de cada parella de plomes. Ha de ser del mínim pes possible, ja que el seu desplaçament només provocarà pèrdues en el rendiment de la instal·lació.

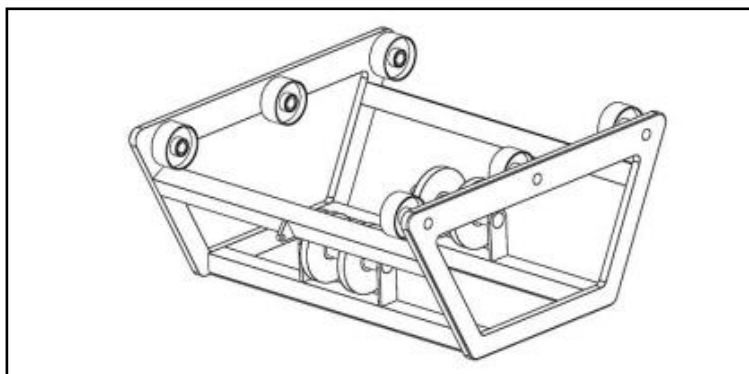


Figura 4.6. Aspecte característic del carro d'una grua. Font: Grúas, Antonio Miravete.

Manteniment

Els cables són una de les parts més importants i crítiques de la instal·lació, i una fallada en aquests podria provocar el col·lapse de la càrrega, amb el conseqüent perill per a la seguretat estructural dels blocs emmagatzemats, o la pèrdua de control sobre el carro del capçal, de manera que aquests hauran de ser inspeccionats periòdicament per a evitar problemes.

Normalment els períodes d'inspecció dels cables segons normativa són de 12 mesos per a qualsevol tipus i de 3 mesos pels que eleven persones. Per a la central objecte es preveurà un manteniment preventiu cada 2 mesos.

També és de gran importància la lubricació del cable si així ho indica el fabricant, ja que evita fregaments, augmentant el rendiment operatiu, alhora que li aporta una vida més llarga a la instal·lació.

Tambors

El tambor es defineix com l'element que enrotllarà el cable i permetrà a la càrrega desplaçar-se verticalment.

El tambor principal anirà connectat a l'eix del motor-generador, i allotjarà el cablejat de desplaçament vertical de les dues càrregues de cada parella de braços, de manera que comunicarà una potència al motor-generador de 2 càrregues.

També hi haurà dos tambors de translació per cada parella, un dedicat al desplaçament horitzontal del carro de cada ploma.

Base de la torre grua

La base serà l'element d'unió entre la grua i el terreny. Serà el primer mòdul, part de la qual anirà enterrada a la cimentació i tindrà una estructura per a poder incloure contrapesos addicionals a la base, tal com es pot veure en la figura 4.7.

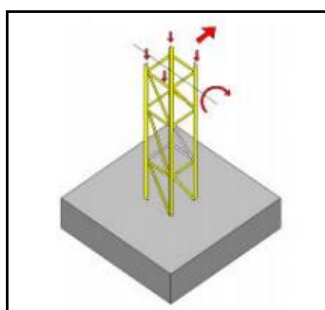


Figura 4.7. Aspecte característic de la base d'una torre grua. Font: Grúas, Antonio Miravete.

Cimentació

El lastre situat en la part inferior de la grua és un dels elements més importants, ja que és l'única connexió física que té amb l'exterior la grua i la funció d'aquest és mantenir l'estabilitat d'aquesta tant en estat de servei com en temps de no operació.

Les dimensions de la cimentació dependran en gran mesura del terreny on es construirà la central, i s'hauran de calcular en funció de les característiques del terreny i dels esforços que es volen donar.

Per a conèixer aquestes dades s'haurà de dur a terme un informe geotècnic, que comptabilitzarà la cota de suport (àrea de suport total de la grua, haurà de ser terreny natural) i la càrrega d'esfondrament del terreny, que significa la pressió màxima suportable per aquest i es mesura a través d'un assaig SPT [16] (assaig de penetració estàndard) si ens situem en terrenys sorrosos.

S'aconsella establir un coeficient de seguretat gran, de l'ordre de 3,5 ja que la grua portarà a terme operacions cícliques durant molt de temps.

Serà fonamental fer inspeccions rutinàries del terreny cada com a màxim 6 mesos per a comprovar que la instal·lació no està patint un esfondrament que comprometi la seva operació.

Els principals esforços transmesos per la torre grua a través de la seva base, degudes al pes, la càrrega de servei i l'efecte del vent hauran de ser absorbits per la seva cimentació. En el catàleg del fabricant de la torre grua objecte es proporciona informació referent a aquests esforços (axial, tallant i moment flector).

4.3.4. Règims de funcionament: càrrega

En els moments que la torre estigui sent utilitzada com a captadora de l'energia sobrant de la xarxa, el sistema de funcionament pot ser variable. No és totalment necessari que totes les grues estiguin operant en sincronia o al mateix temps, senzillament es pot distribuir l'energia cap als motors que interessin per l'operació si l'energia cedida per la xarxa és petita. Per altra banda, si l'excedent energètic és gran, el límit de captació d'energia serà igual a la potència màxima dels 3 motors funcionant a ple rendiment, ja que els 3 capçals estaran elevant blocs a la vegada.

Tot i això, per tal d'unificar els criteris dels moviments de càrrega i descàrrega, s'opta per carregar els blocs seguint el mateix principi que s'explicarà per la descàrrega, és a dir, fer funcionar els diferents capçals i braços seguint una sincronia concreta. També és un règim més adequat si la captació energètica es vol fer de manera contínua.

4.3.5. Règims de funcionament: descàrrega

El règim de funcionament en descàrrega comporta més necessitats tècniques per a que sigui efectiu per a transmetre energia de manera estable a la xarxa. Com que l'*output* esperat de la bateria difícilment serà un impuls, es requerirà que la central funcioni de manera precisa i controlada per a poder oferir energia de manera contínua.

Això només es podrà aconseguir gestionant síncronament els diferents braços i capçals, per tal de fer descendir els contenidors del nivell superior a l'inferior a un ritme determinat. Com ja s'ha dit anteriorment, en comptar amb 3 capçals, s'estima convenient fer-los funcionar en règim de 2 a 1 com a mínim, és a dir, 2 capçals oferint energia en tot moment (descarregant els contenidors) mentre l'altre es re posiciona per a poder agafar el següent contenidor del seu recorregut.

Per tant, és imprescindible la coordinació entre els generadors de les grues, ja que a través d'un correcte control de l'acceleració i les velocitats de baixada es podran sincronitzar els capçals i oferir una potència aproximadament estable.

4.3.6. Règims de funcionament: equilibrador de xarxa

La bateria, en cas de que el seu objectiu fos equilibrar les pertorbacions de la xarxa, hauria de funcionar en un règim semblant al de descàrrega, coordinant adequadament els diversos desplaçaments dels braços així com les velocitats i acceleracions de descàrrega dels contenidors i tenint la capacitat d'invertir el moviment en qualsevol moment, per tal de compensar els desfasaments i pertorbacions energètiques que apareixin a la xarxa.

4.3.7. Paràmetres del moviment dels capçals

S'ha mencionat que tots els capçals tindran unes operacions definides per un temps de funcionament i un conjunt de temps morts que serveixen per carregar o descarregar el bloc en curs així com per reposicionar el capçal un cop hagi acabat l'operació per tal de desplaçar

el següent bloc a ser transportat.

El temps per a realitzar el conjunt d'operacions que integren el desplaçament d'un bloc en el moviment de descàrrega fins a l'inici de l'operació del següent es pot definir com a:

$$t_{total} = t_{enganx} + t_{desp.hor} + t_{útil} + t_{desenganx} + t_{següent}$$

On:

- t_{enganx} és el temps que triga el capçal a subjectar el bloc que està a punt de fer l'operació
- $t_{desp.hor}$ és el temps que triga el capçal a recórrer la distància horitzontal entre la ubicació del bloc al nivell superior i la vertical de la posició del nivell inferior on acabarà el bloc
- $t_{útil}$ és el temps en què es generarà energia, és a dir, durant la baixada del nivell superior al nivell inferior per part del bloc.
- $t_{desenganx}$ és el temps que triga el capçal a desenganxar el bloc que estava realitzant l'operació
- $t_{següent}$ és el temps que triga el capçal a tornar a pujar al nivell superior (aquest cop sense pes) alhora que el braç ja s'ubica per a enganxar el següent bloc

L'únic temps durant el qual es consumirà o generarà una potència útil serà el de desplaçament vertical. La resta de temps suposaran instants en que la grua en qüestió es trobarà realitzant operacions no productives que es comptabilitzaran com a pèrdues en el rendiment.

Aquesta distribució temporal ajuda a concebre una millor idea de com es reparteix el temps d'operació en cada etapa de funcionament de la instal·lació, alhora que permet desglossar les operacions per tal de poder fer una millor estimació de quins són els moviments crítics de la instal·lació així com el rendiment esperat.

En el cas de la càrrega es tindran els mateixos temps, encara que en un altre ordre.

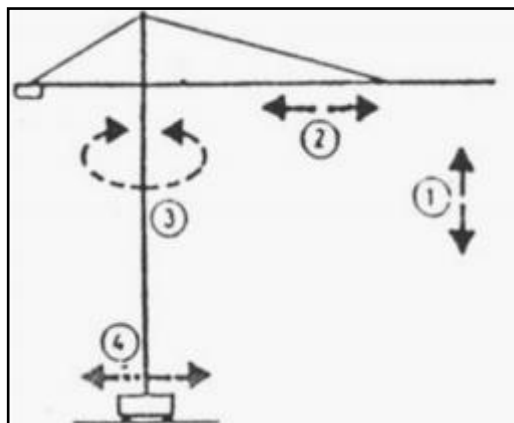


Figura 4.8. Esquemàtic representatiu dels moviments principals d'una torre gruera. Font: <https://www.monografias.com/trabajos32/grua-torre/grua-torre.shtml>.

El moviment angular del braç de la torre es farà paral·lelament al desplaçament horitzontal del bloc, per tal d'aprofitar al màxim el temps. D'altra banda, s'haurà de tenir en compte el consum del motor que permet la rotació així com el consum del motor auxiliar per a moure el bloc horitzontalment.

Tenint en compte que l'únic moviment que generarà energia és el de baixada del bloc, és primordial organitzar les estructures superiors i inferiors de la central de la manera més eficient possible. Això s'aconseguirà a través d'una correspondència adequada entre les posicions inicials i finals del bloc, minimitzant les longituds de desplaçament tant radials com angular per al moviment de tots els blocs, per no crear un excessiu desfasament entre desplaçaments no útils de diferents contenidors.

4.3.8. Disseny dels pisos superior i inferior

Aquesta correspondència només es podrà aconseguir a través d'un disseny adequat dels nivells. Davant les múltiples possibles disposicions de blocs, s'han analitzat algunes alternatives que presentaven avantatges interessants.

Tot i això, la solució més adequada, alhora que més pràctica, ha sigut organitzar els blocs quadrículadament en quatre direccions i fer uns pisos superior i inferior amb una relació de 3:1, és a dir, que per cada 3 pisos superiors que es buiden s'emmagatzemen els seus blocs en un sol pis inferior. A través d'aquest disseny es maximitza el desplaçament vertical dels blocs, ja que, per exemple, d'una torre de 9 nivells, es podrien emmagatzemar tots els seus blocs en tan sols 3 nivells inferiors, cosa que permetria fer servir més eficientment els últims pisos del nivell superior en fase de descàrrega.

Tanmateix, segueix existint el problema de la inutilitat dels nivells més baixos del pis superior, ja que es trobaran a la mateixa alçada o menor que els blocs més alçats del pis inferior.

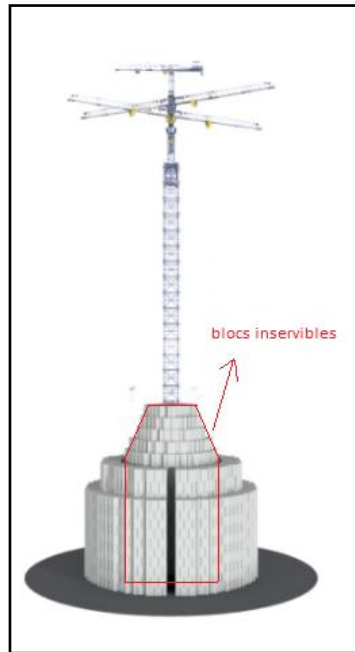


Figura 4.9. Representació dels blocs no desplaçables Font: energyvault.com.

Per tal de solucionar aquesta problemàtica, existeixen dos opcions: o bé fer més profund el nivell inferior o bé elevar tot el nivell superior. Les dues opcions comporten riscos i beneficis. En el cas de fer més profund el nivell inferior, és a dir, fer una excavació radial respecte el centre de la torre per a guanyar metres verticals, la opció és segura, incrementa el rendiment i tindria un millor impacte visual, ja que el nivell inferior podria quedar parcial o totalment soterrat. Per altra banda, però, incrementa sensiblement el cost de la instal·lació, ja que cada metre guanyat en altura significaria una gran quantitat de terra excavada tenint en compte l'extensió de la superfície del nivell inferior.

L'altre opció és fer més alt el nivell superior a través d'una estructura de suport dels contenidors. Aquesta opció serà més barata i permetrà guanyar un bon espai entre els dos nivells, encara que s'haurà de tenir en compte l'augment del risc per a l'estructura degut a una major altura i el conseqüent major impacte del vent, així com l'impacte visual que tindrà. Per tant, s'haurà de buscar un equilibri entre aquests dos factors per a trobar la millor solució possible.

En quant a la màxima altura en blocs del nivell superior, aquesta vindrà donada per la limitació en alçada dels moviments de les torres grua.

5. Disseny de la central d'emmagatzematge d'energia potencial

5.1. Pre-dimensionament

5.1.1. Torres grua de referència

Amb l'objectiu de projectar una instal·lació el més realista possible, es fa una recerca en el mercat de torres grua de grans prestacions, per tal de poder establir els límits geomètrics i operatius de la central objecte d'aquest projecte.

La grua escollida com a model de disseny és la 1250 HC 40 de l'empresa Liebherr [17]. S'ha escollit aquest model ja que és capaç de moure grans càrregues i suportar moments flectors de l'ordre de 10.000 kN·m, paràmetre determinant a l'hora de conèixer la extensió màxima de la càrrega en el braç.

Davant el gran nombre de possibilitats motrius que ofereix la instal·lació i seguint l'objectiu de projectar una central tant realista com sigui possible, s'han establert alguns valors de referència en les operacions seguint les característiques tècniques detallades en l'Annex 01. Fitxes tècniques per a les grues Liebherr 1250 HC 40.

Segons el seu manual, l'estructura de les grues permet:

- Velocitat màxima de desplaçament horitzontal amb un motor de 11 kW: 68 m/min per a càrregues de fins a 40 tones:
- Moment flector màxim: 11.300 kN·m.
- Longitud màxima per a càrrega de 28 tones: 41,2 m
- Màxima velocitat angular per a motor de 3 x 11 kW
- Longitud d'extensió màxima del cable: 80 m

5.1.2. Contenedors de referència

En l'actualitat, el sistema de transport de gran capacitat més implementat és el transport marítim amb les mercaderies emmagatzemades en contenidors de 20 peus o *dry-van*. Aquests es caracteritzen per estar disposats sobre la coberta de l'embarcació formant files i

columnes compactes, on la seguretat estructural per a resistir la força de l'onatge s'aconsegueix a través de fixacions entre ells, conegudes com a *twistlocks* (bloquejadors de gir) . Les dimensions dels contenidors es medeixen habitualment amb el sistema anglosaxó (peus) i s'especifiquen tant les dimensions exterior com les interiors o útils. En la següent imatge es poden veure les seves característiques estandarditzades.

CONTENEDOR DRY-VAN 20'

PESO	VACIO	2.250 Kg	
	PESO MAXIMO	28.240 Kg	
MEDIDAS	EXTERNO	INTERNO	PUERTAS ABIERTAS
LARGO	6.058 mm	5.900 mm	-
ANCHO	2.438 mm	2.345 mm	2.335 mm
ALTO	2.591 mm	2.400 mm	2.290 mm
VOLUMEN	33,30 m ³		



Figura 5.1. Dimensions estàndard dels contenidors *dry-van* de 20 peus. Font: https://www.moldtrans.com/wp-content/uploads/2014/07/contenedores_maritimo.pdf

El pes i càrregues dels contenidors sí que poden variar sensiblement depenent de l'ús que se li doni i l'empresa que l'estigui utilitzant. Un d'aquests contenidors té un pes o tara al voltant de 3.750 kg i admet un pes màxim d'entre 25.000 i 29.000 kg [18], per tant, es prendrà el valor de 28.000 kg (28 tn) com a valor referència per al projecte.

Per altra banda, el número màxim de contenidors apilats verticalment en el transport marítim se situa en els 12 [19], ja que no es sobrepassa aquesta xifra per a més seguretat. Si tenim en compte que l'estructura no haurà de suportar forces laterals de la magnitud de les marítimes, es podrien arribar a col·locar els contenidors en uns 14 o 15 pisos.

Les dimensions dels contenidors que es prendran com a referència per a fer el disseny geomètric de la central s'aproximaran a:

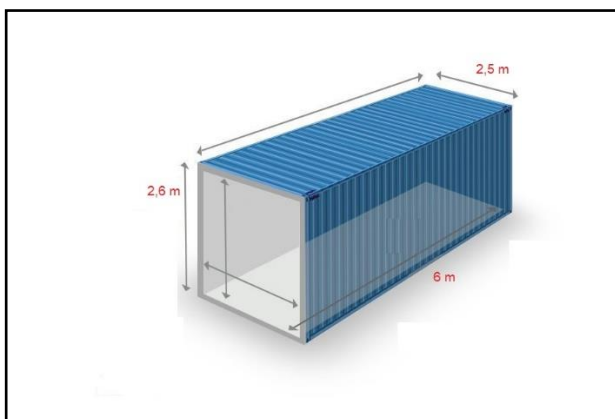


Figura 5.2. Dimensions de referència dels contenidors per al projecte. Font: propi.

5.2. Disseny de la central d'emmagatzematge d'energia potencial

5.2.1. Materials utilitzats com a element emmagatzemador

Com ja s'ha mencionat anteriorment, les prioritats d'aquest projecte són el baix cost i el mínim impacte ambiental a l'hora de la construcció i manteniment de la instal·lació. Per aquest motiu, i degut a les múltiples possibilitats que s'obren a l'hora d'escollir materials que facin el paper d'emmagatzemador cinètic, es proposen dos possibles solucions depenent de la ubicació de la instal·lació.

Es considera que si la instal·lació està propera a una gran font d'aigua, com un oceà o un riu cabalós, es podrien omplir els contenidors amb aigua directament, ja que només faria el paper d'element emmagatzemador, i l'obtenció dels materials seria barata i ràpida, a més que tampoc suposaria un gran estrall mediambiental si els recursos hídrics de l'indret no són escassos.

Tanmateix, omplir els contenidors amb aigua comportaria certs problemes. Primerament, en no ser un material sòlid, és possible que en els moviments de translació dels contenidors, l'aigua present en el seu interior provoques certes tensions i impulsos no desitjats, així com vibracions que afectarien negativament la precisió de la col·locació dels contenidors, paràmetre imprescindible per al correcte funcionament de les grues i la seguretat estructural de la bateria. Per altra banda, l'aigua és un element oxidant que faria que la vida útil dels contenidors es reduís, o bé s'haurien de pal·liar els seus efectes mitjançant un tractament superficial previ a la construcció de la instal·lació, fet que encariria sensiblement la inversió

inicial del projecte.

També s'ha de tenir en compte, com ja s'ha vist a la comparativa de solucions d'emmagatzematge d'energia, que amb presència de recursos hídrics importants poden haver-hi millors alternatives si es vol emmagatzemar energia.

Per aquests motius, es busca una altre opció que compti també amb la polivalència suficient com per no haver de dependre de la presència de reserves d'aigua properes al lloc de la bateria. Així doncs, es considera raonable obtenir els recursos necessaris per omplir els contenidors que hi haurà en la instal·lació a través d'una excavació in-situ, emprant els propis materials extrets (sorres, argiles, terres, roques, etc.) com a element emmagatzemador. A més a més, es vol utilitzar el volum d'espai obtingut com a pis inferior d'emmagatzematge de la instal·lació. D'aquesta manera, es guanyarien uns metres extra de desplaçament entre el nivell superior i inferior, ampliant sensiblement la capacitat d'emmagatzematge de la bateria i reduint l'impacte visual de la instal·lació.

5.2.2. Excavació i creació del doble nivell

Tal i com s'ha explicat en el capítol anterior, es vol maximitzar la distància entre els nivells superior i inferior mitjançant una excavació que permeti al nivell inferior restar uns metres per sota el nivell de rasant alhora que s'eleva el nivell superior mitjançant una estructura de suport de formigó.

S'ha de tenir en compte el fet que es volen emmagatzemar elements rectangulars a través d'un operador rotatiu (torre grua), per tant la distribució en nivells dels contenidors ha de satisfer els diferents requisits d'ambdues geometries.

En el següent esquemàtic es presenta un esbós de la base de la instal·lació de la central. En la part enfonsada s'hi allotjaran els contenidors que es trobin en el nivell inferior, i l'altiplà central servirà com a base de la torre i l'estructura de suport del nivell superior.

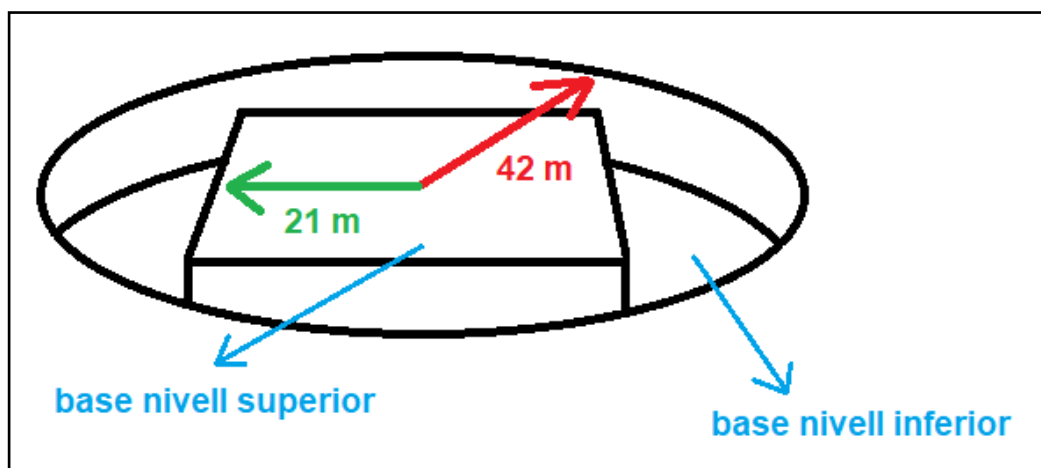


Figura 5.3. Esquemàtic de la geometria de l'excavació de la base de la bateria. Font: propi.

A priori es vol fer una excavació d'uns 5 metres de profunditat, i si tenim en compte la superfície que queda entre el quadrat central i la circumferència de radi de 42 m (que ve imposada per la longitud màxima de càrrega/descàrrega d'un bloc de 28 tn per la torre grua 1250 HC de Liebherr més 2 metres de seguretat per al correcte allotjament dels blocs més allunyats del centre), el volum que s'haurà d'excavar en total serà de:

$$V (m^3) = (\pi \cdot r^2 - A_{niv.sup.}) \cdot h_{niv.inf} = (\pi \cdot 42^2 - 42^2) \cdot 5 = 18.888,85 m^3$$

S'haurà de tenir en compte el cost de l'excavació a l'hora de fer el pressupost de la central, i també comprovar que el material extret és suficient com per a satisfer els requisits de pes dels contenidors, que s'ompliran amb els materials extrets en la creació del calaix del nivell inferior.

5.2.3. Disseny de l'estructura de torres grua

Per a dimensionar l'estructura central des d'on operaran els braços de la instal·lació, s'ha de tenir en compte el pes propi de l'estructura de la torre, així com els diferents pesos que pugui estar transportant, i el material mecànic i elèctric que hi serà present.

Per a establir el número de braços i capçals s'haurà de valorar quin tipus d'entrega energètica esperada tindrà la central.

Número de braços

Tal com s'ha vist en el model proposat per Energy Vault i s'ha explicat anteriorment, la torre central haurà de comptar amb un total de 3 braços de doble capçal (doble ploma) per tal de poder fer un consum o entrega energètics constants i estables.

Cadascun dels braços tindrà assignada una posició angular màxima i mínima, i s'haurà de vetllar en tot moment perquè no hi hagi creuament ni interferències entre els seus desplaçaments.

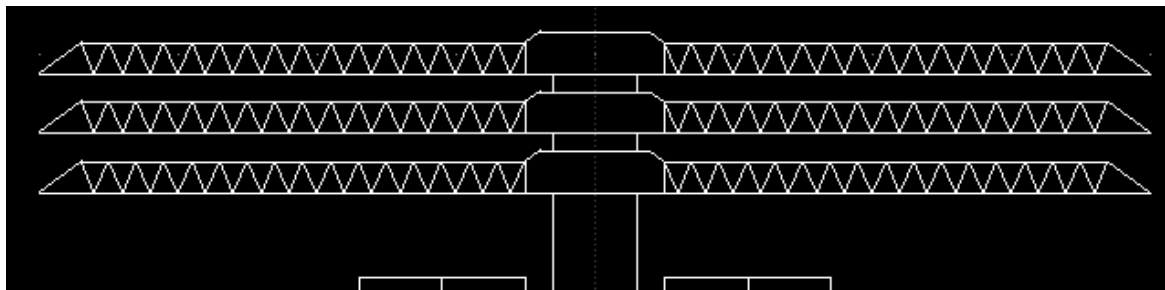


Figura 5.4. Alçat dels 3 braços si es situessin en el mateix angle. Font: propi.

En la figura 5.4 es poden veure els 3 braços que operaran les càrregues. Són dobles, és a dir, tindran dos capçals, un per cada banda, pel que cadascun haurà de suportar el moment angular provocat per dues càrregues. Al centre s'hi allotjarà una cabina on anirà col·locada la maquinària elèctrica, i des d'on s'enviarà el cablejat elèctric cap al quadre principal situat en la base de la torre.

El seu paràmetre de control serà el seu angle relatiu a la línia de referència. Es modificarà la seva posició mitjançant un motor auxiliar rotatiu.

Capçals

De cara a un únic capçal, i degut a la naturalesa de la instal·lació i el seu ús de l'energia potencial, tenim pocs paràmetres on actuar de cara al control del funcionament i la seva entrega energètica, més enllà d'actuar en els materials dels que estan construïts els blocs (fase de construcció, fer-los més o menys pesants) o bé en la velocitat d'ascens o de descens del bloc (quan la torre està operativa). Per tant, serà a través de la velocitat de baixada o pujada del bloc i la seva acceleració, paràmetres directament proporcionals a la potència que s'entrega al generador, que es podrà regular l'*output* o *input* energètic que s'oferirà a la xarxa.

Tanmateix, la instal·lació no pot funcionar a través d'un únic capçal, ja que en les operacions de baixada i pujada el primer moviment del cicle és el d'agafar el contenidor i l'últim el de deixar-lo, dos instants en els que no es generarà ni emmagatzemarà energia. Per tant, es fa necessari dotar la central de més capçals, ja que a través d'aquests i la correcta regulació del seu moviment, la seva acceleració i desacceleració durant tota la translació, es podrà regular la captació o entrega d'energia de manera estable i controlada.

En el moviment, es podria dividir el temps de funcionament en temps d'entrega (t_e) i temps morts (t_r), presentant-se el primer com l'únic temps en que s'aporta treball útil. Per tant, és necessària la instal·lació de més capçals que puguin seguir treballant durant el temps mort d'operació dels altres. En el model d'Energy Vault es proposa el muntatge de 6 capçals motors ubicats en 3 braços dobles independents, que oferiran llibertat de moviment radial a cada parella de capçals que continguin. S'estima aquest número de braços com a adequat, ja que un número menor no permetria assegurar l'entrega contínua de potència elèctrica, i un número major podria provocar grans problemes de funcionament, podent arribar a causa xocs entre blocs i posant en perill la seguretat estructural de la torre.

Tot i així, de cara a la dificultat tècnica afegida per deixar dos contenidors a dues posicions diferents al mateix temps amb un sol grau de llibertat angular, es proposa utilitzar grues de doble capçal per a la central objecte. D'aquesta manera, es maximitzarà el temps de càrrega i descàrrega de la central i s'assegurarà un funcionament més segur.

S'ha valorat la possibilitat de fer funcionar la instal·lació amb 3 braços amb un únic capçal (fent servir el contrapès típic d'aquest tipus de maquinària, composant una ploma i contraploma). Tot i així, s'ha descartat aquesta opció, ja que suposaria una pèrdua de rendiment degut a la necessitat constant de moure la càrrega de contrapès en les operacions de desplaçament angular dels braços.

Mitjançant 2 capçals a cada braç, es maximitza la potència que pot arribar a oferir o rebre la instal·lació, ja que d'aquesta manera es poden estar carregant o descarregant el doble de càrregues en cada instant. El motor-generador s'encarregarà per tant de dues càrregues.

És necessari apuntar que els dos capçals hauran d'estar portant a terme les operacions de manera coordinada i exacta, és a dir, establir una simetria pràcticament perfecta entre els dos moviments dels capçals i les seves càrregues, ja que només així es pot assegurar que l'estructura central no rebrà tensions majors d'un costat que de l'altre i s'evitaran malfuncions i redundàncies en el funcionament del motor-generador.

Els seus principals paràmetres de control seran:

- Distància dels carros dels capçal sobre l'eix radial (part horitzontal de la grua)
- Posició vertical de la càrrega en qualsevol moment donat
- Operació que s'estigui portant a terme (enganxament, desplaçament horitzontal, vertical, desenganxament o reposició)

5.2.4. Dimensionament en alçat i planta de la instal·lació

Els plànols que es presenten en aquest apartat es poden trobar ampliats en l'Annex 03. Plànols de la instal·lació.

De cara al dimensionament dels nivells d'apilament superior i inferior del projecte, es fixarà el número màxim d'apilament en el nivell superior en 15. Tenint en compte la relació 3:1 que s'ha adoptat per a la correspondència dels contenidors entre els nivells, l'inferior ha de constar de 5 plantes.

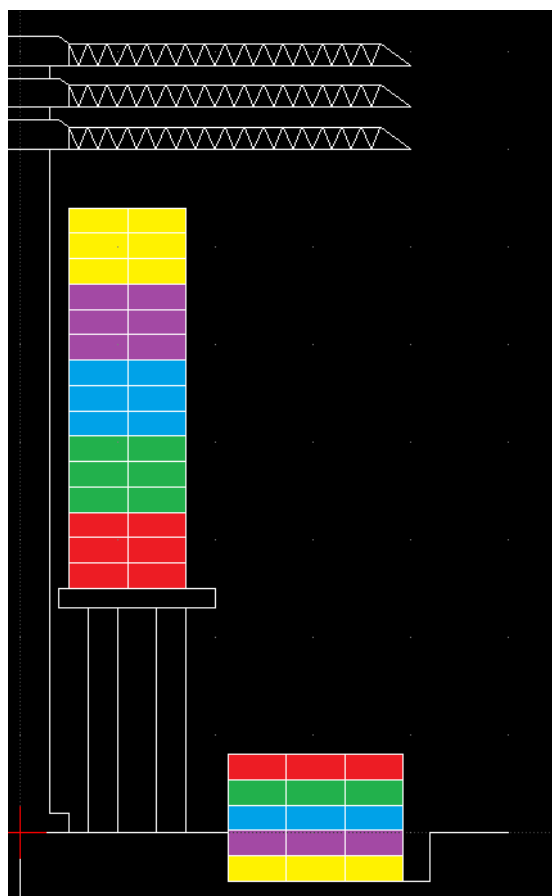


Figura 5.5. Esquemàtic il·lustratiu de la correspondència entre nivells 3:1. Font: propi.

Es prenen com a xifres de disseny les 28 tones que pot pesar un contenidor i les dimensions agafades per aquests són 2,5 x 2,6 x 6 m (amplada x alçada x profunditat). El radi màxim d'ubicació dels blocs és igual a la distància màxima de càrrega/descàrrega d'un bloc de 28 tn per a la torre HC 1250, és a dir, 40 m.

En quant al número i distribució espacial dels blocs en ambdós nivells, s'ha elaborat el següent disseny per als dos nivells d'apilament de la central objecte:

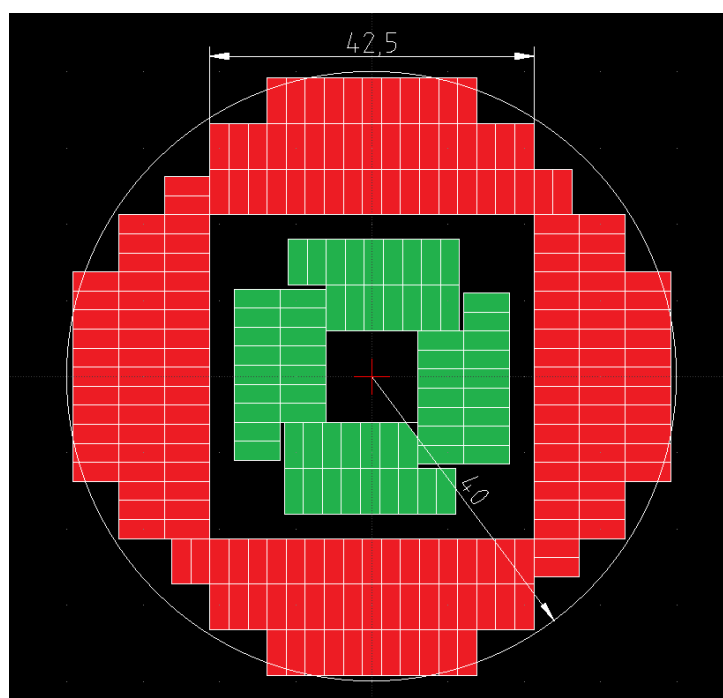


Figura 5.6. Esquemàtic de la geometria dels nivells superior i inferior. Font: propi.

En la figura anterior es pot apreciar la distribució dels contenidors tant en el nivell superior (verd) com en el nivell inferior (vermell). Estan col·locats en 4 quadrants, orientats en cada direcció cardinal per a facilitar el transport i no haver de rotar el contenidor sobre el seu eix durant la translació entre els dos nivells. Cada contenidor tindrà assignada una posició al pis superior i a l'inferior, i sempre es transportaran respectant aquesta correspondència, que haurà de ser optimitzada per a reduir al màxim els desplaçaments que consumeixin energia.

Cada pis del nivell superior compta amb 4 grups de 16 contenidors col·locats en una columna interior de 7 i una exterior de 9 tal i com es presenta en la figura 5.6. Per tant, cada pis del nivell superior contindrà 64 blocs. Respectant la correspondència de 3:1, en cadascun dels 5 pisos del nivell inferior hi haurà d'haver un total de 192 contenidors, que estaran distribuïts en 4 grups de 48, amb rengles de 19, 17 i 11 contenidors respectivament.

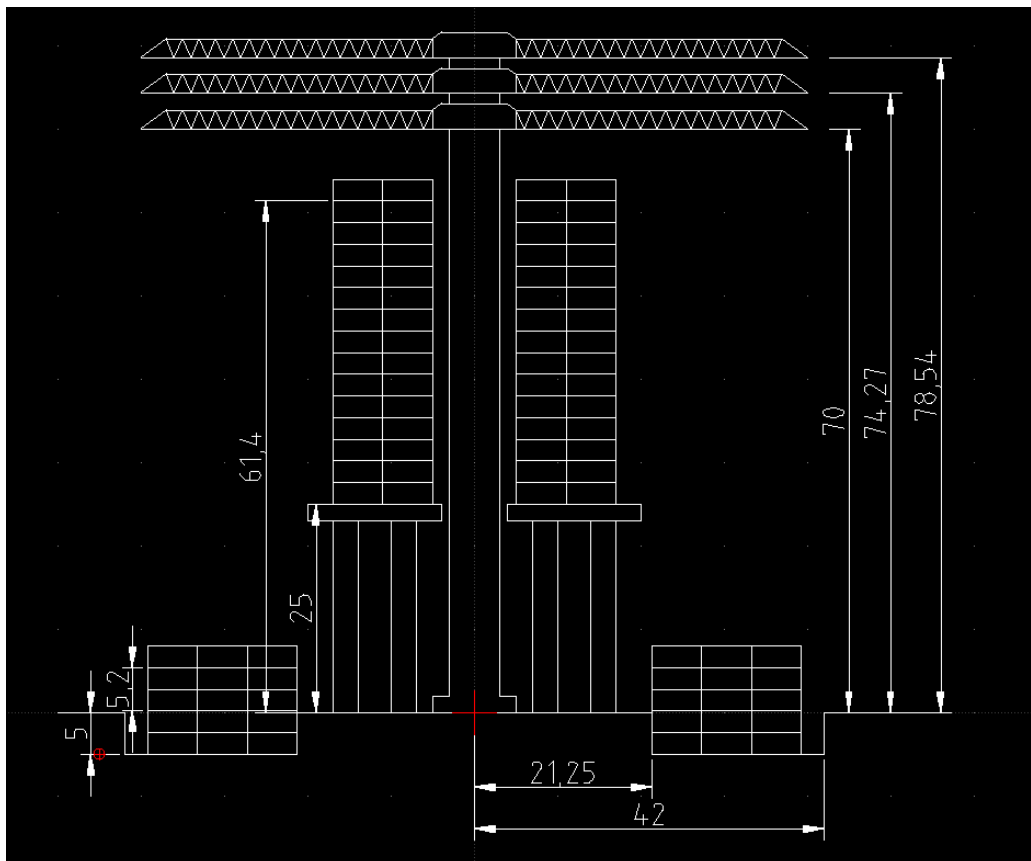


Figura 5.7. Esquemàtic de l'alçat de la central d'emmagatzematge amb les seves principals dimensions. Font: propi.

Tal com es pot veure en la figura 5.7, tenint en compte la fonamentació practicada per al nivell inferior així com l'alçada de l'estructura de suport que es construirà pel nivell superior, les altures màximes i mínimes del nivell superior són:

$$h_{\text{mín nivell superior}} = h_{\text{estructura}} = 25 \text{ m}$$

$$h_{\text{màx niv.sup.}} = h_{\text{estructura}} + (N_{\text{pisos niv.sup.}} - 1) * h_{\text{contenedor}} = 25 + 14 * 2,6 = 61,4 \text{ m}$$

I per al nivell inferior:

$$h_{\text{mín niv.inf.}} = h_{\text{fonaments}} = -5 \text{ m}$$

$$h_{\text{màx niv.inf.}} = h_{\text{fonaments}} + (N_{\text{pisos niv.inf.}} - 1) * h_{\text{contenedor}} = -5 + 4 * 2,6 = 5,4 \text{ m}$$

Aquestes alçades es mesuren des de la base dels contenidors i prenent la rasant (línia de terra) com a referència. Per tant, les característiques principals dels dos nivells es poden englobar en:

Nivell superior		Nivell inferior	
Contenidors per pis	64	Contenidors per pis	192
Pisos	15	Pisos	5
Alçada màxima (m)	61,4	Alçada màxima (m)	5,4
Alçada mínima (m)	25	Alçada mínima (m)	-5

Taula 5.8. Número de contenidors i alçades de cada nivell. Font: propi.

5.2.5. Estructura de suport i torre central

Així doncs, es disposa d'un total de $64 \times 15 = 960$ contenidors per a fer l'emmagatzematge d'energia potencial. L'estructura que suporta el nivell superior haurà de poder resistir la càrrega addicional que suposaran els contenidors quan estiguin emmagatzemats completament en el nivell superior. Si cada contenidor aporta un pes de 28 tn, el pes total de tots ells és de 26.880 tn, una càrrega equivalent a un tren de mercaderies de 200 vagons aproximadament [20].

Per tal de suportar l'enorme càrrega que tindrà col·locada al damunt, l'estructura haurà de ser construïda en formigó armat, amb un número i dimensió de pilars suficient com per a resistir l'esforç de compressió i un forjat de gruix suficient com per a resistir la càrrega per m² dels contenidors disposats verticalment.

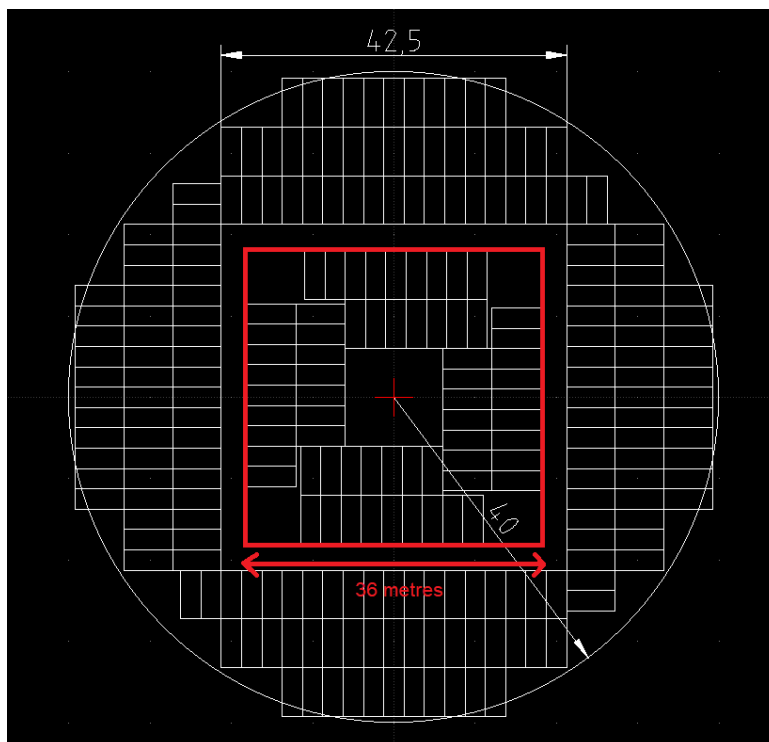


Figura 5.9. Imatge en planta de les dimensions del forjat. Font: propi.

Com es pot veure en la figura 5.9, el forjat serà quadrat amb 36 metres per costat, amb un forat central de 12 metres de costat, i ocuparà una àrea total de 1152 m². La càrrega que haurà de suportar per m² en els punts on reposin contenidors serà de:

$$Q \left[\frac{kN}{m^2} \right] = \frac{m_{\text{contenidors}} \cdot N_{\text{pisos}} \cdot g}{A_{\text{contenidor}}} = \frac{28 \text{ tn} \cdot 15 \cdot 9,8 \frac{m}{s^2}}{2,5 \cdot 6 \text{ m}^2} = 274,4 \frac{kN}{m^2}$$

El forjat haurà de ser per tant resistent a càrregues d'aquesta magnitud. S'estima convenient fer un forjat de formigó de lloses alveolars d'un gruix d'aproximadament 2 metres. Tenint en compte que la densitat d'un formigó de bona qualitat està sobre els 2500 kg/m³ [21], el pes que tindrà el forjat serà de:

$$m \text{ [tn]} = V \text{ (m}^3\text{)} \cdot \rho \left(\frac{\text{tn}}{\text{m}^3} \right) = 1152 \text{ m}^2 \cdot 2 \text{ m} \cdot 2,5 \frac{\text{tn}}{\text{m}^3} = 5760 \text{ tn}$$



Figura 5.10. Aspecte típic d'un encofrat abans de col·locar-hi el formigó per a consolidar un forjat. Font: http://oa.upm.es/55966/1/Proyecto_estructuras_hormigon.pdf

Tenint en compte el forjat, a més del pes total dels contenidors, es té una càrrega total de:

$$Q [kN] = (m_{\text{contenidors}} \cdot N_{\text{total contenidors}} + m_{\text{forjat}}) \cdot g = (28 \text{ tn} \cdot 960 + 5760 \text{ tn}) \cdot 9,8 \\ = 319.872 \text{ kN}$$

Segons el que indica la EHE, la instrucció normativa que regeix a Espanya per al càlcul d'estructures de formigó, una manera senzilla de calcular l'àrea necessària de pilars de formigó en la construcció es determina segons [22]:

$$A = \alpha \cdot \frac{Q}{f_{ck}} [xxx]$$

Sent:

- A l'àrea en m^2
- α el coeficient adimensional de seguretat
- Q la càrrega de servei suportada en kN
- f_{ck} la resistència característica del formigó

RESISTENCIA CUBICA DE 200 mm a 28 Dias	
GRADO DEL HORMIGON	RESISTENCIA CUBICA A LA COMPRESION ESPECIFICADA (MPa) fc
H - 5	(*)
H - 10	(*)
H - 15	15
H - 20	20
H - 25	25
H - 30	30
H - 35	35
H - 40	40
H - 45	45
H - 50	50
H - 55	55
H - 60	60

Figura 5.11. Resistències a compressió del formigó segons el seu grau. Font: <http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/laboratorionacional/MaterialCursos/Eval%20Hor%20estructural%20%2020214.pdf>

Per tant, si prenem un coeficient de seguretat de 1,5, i la resistència característica d'un formigó de qualitat alta sobre els 50 MPa [23], obtenim una àrea mínima de:

$$A = 1,5 \cdot \frac{319.872 \text{ kN}}{50 \text{ MPa} \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]} = 95,9 \text{ m}^2$$

Així doncs l'estructura de suport del pis superior haurà de comptar amb una àrea de secció mínima de 95,9 m². Aquesta estructura es podria construir com a diversos pilars, ubicats en la base de la planta superior com es representa en el següent esbós.

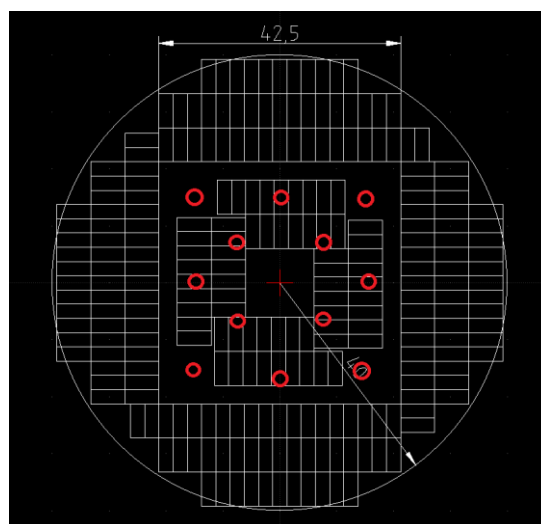


Figura 5.12. Esquemàtic de la ubicació dels pilars de suport del forjat del pis superior. Font: propi.

Comptarem doncs amb 12 pilars de 25 m d'alçada i una secció de $95,9 / 12 = 7,99 \text{ m}^2$, pel que el seu diàmetre serà de 3,19 m.

Val a dir que si es volgués calcular de manera precisa l'estructura de formigó, s'hauria de fer un estudi complet contemplant la llum entre pilars, les càrregues puntuals (efecte del vent, càrrega de neu, etc.), càlculs complexos i que desviarien l'atenció de l'objectiu principal d'aquest projecte, que és valorar energètica, ambiental i econòmicament la viabilitat d'una instal·lació amb les característiques descrites.

Comptant amb un 25% extra de formigó per als fonaments dels pilars, així com el forjat que servirà de recolzament del pis superior, la quantitat total de formigó que s'hauria de generar seria de:

$$\begin{aligned} m \text{ (tn)} &= \left(m_{\text{forjat}} + V_{\text{pilars}} \text{ (m}^3\text{)} \cdot \rho \left(\frac{\text{tn}}{\text{m}^3} \right) \right) \cdot 1,25 \\ &= \left(5760 \text{ tn} + 12 \cdot 25 \text{ m} \cdot 7,99 \text{ m}^2 \cdot 2,5 \frac{\text{tn}}{\text{m}^3} \right) \cdot 1,25 = 14.691 \text{ tn} \end{aligned}$$

5.3. Estudi del funcionament

5.3.1. Correspondència

Un cop vistos els principals elements que compondran la central d'emmagatzematge, s'estableix una correspondència per blocs entre els dos nivells de l'estructura, de manera que es pugui fer un anàlisi detallat d'un ordre de càrregues i descàrregues determinat.

Les principals directrius establertes per al disseny de la correspondència han estat:

- Uniformitzar tant com sigui les distàncies recorregudes entre blocs i per diferents pisos
- Fer desplaçaments angulars més grans en els moments que no hi ha càrrega als braços
- Establir un ordre que permeti operar a més d'un capçal en un quadrant en un moment donat

Per tant, per tal de fer funcionar la central de la forma més eficient possible, es requereix minimitzar els desplaçaments que provoquen un consum energètic el màxim possible. A través del disseny realitzat, s'han minimitzat tant com ha sigut possible els desplaçaments horitzontals i s'han maximitzat els verticals. Tanmateix, el fet d'haver organitzat els contenidors de manera quadriculada enfront de la circularitat dels moviments angulars de les grues fa que

siguin necessaris petits moviments angulars dels braços en pràcticament totes les operacions per tal de situar correctament els capçals. Aquests hauran de ser tinguts en compte a l'hora de calcular l'energia consumida total, així com el desplaçament del capçal sense càrrega i les pèrdues per fregament.

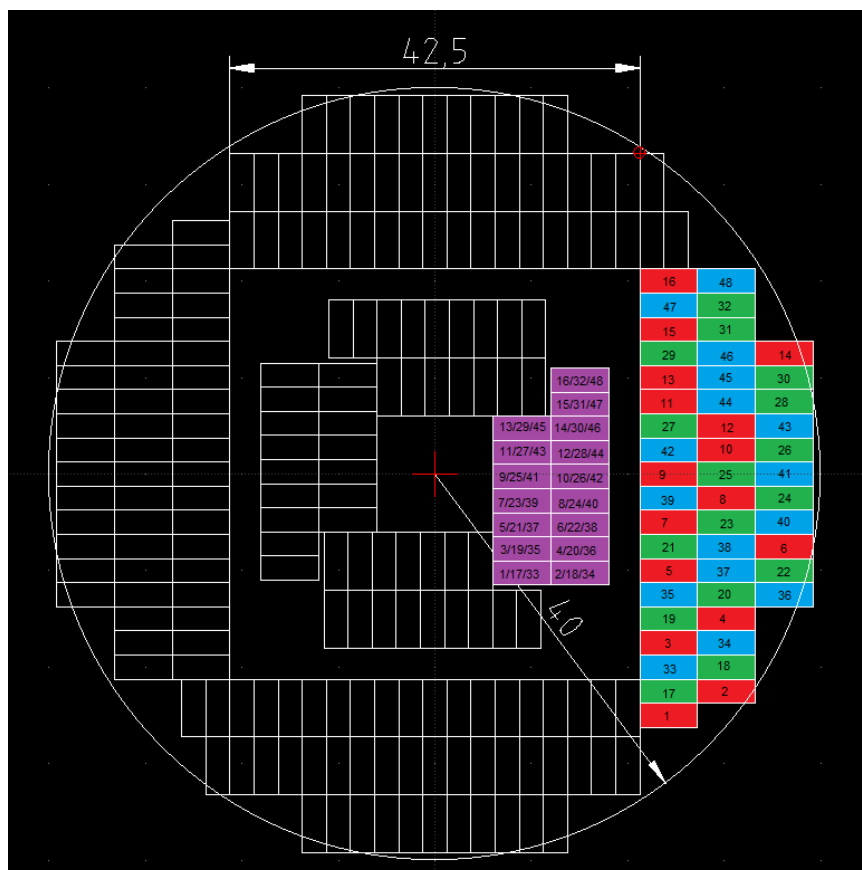


Figura 5.12. Esquemàtic de la correspondència de blocs entre 3 pisos del nivell superior i el seu pis inferior. Font: propi.

En la figura xx es pot veure la correspondència d'un quadrant entre els seus 3 pisos superiors i l'inferior. Els contenidors estan numerats seguint l'ordre en que seran carregats o descarregats. En els contenidors de color púrpura es poden veure 3 números, un per a cada contenidor ubicat en la mateixa posició verticalment en el pis superior, mentre que en el nivell inferior es poden veure els contenidors en 3 colors: els vermells serien corresponents a un dels pisos superiors, els verds al següent i els blaus a l'últim de cada 'paquet' de 3 pisos.

Per tal de ponderar els moviments radials del capçal així com el desplaçament angular dels

braços en cada moviment, s'han fixat les posicions dels contenidors tant en el nivell superior com en l'inferior. Les posicions en coordenades fixant el centre de rotació com a 0,0 són:

Posició nivell superior				
N	x (m)	y (m)	radi (m)	alpha (º)
1	9	-10,15	13,57	-48,44
2	15	-10,15	18,11	-34,08
3	9	-7,65	11,81	-40,36
4	15	-7,65	16,84	-27,02
5	9	-5,15	10,37	-29,78
6	15	-5,15	15,86	-18,95
7	9	-2,65	9,38	-16,41
8	15	-2,65	15,23	-10,02
9	9	-0,15	9,00	-0,95
10	15	-0,15	15,00	-0,57
11	9	2,35	9,30	14,63
12	15	2,35	15,18	8,90
13	9	4,85	10,22	28,32
14	15	4,85	15,76	17,92
15	15	7,35	16,70	26,10
16	15	9,85	17,94	33,29
17	9	-10,15	13,57	-48,44
18	15	-10,15	18,11	-34,08
19	9	-7,65	11,81	-40,36
20	15	-7,65	16,84	-27,02
21	9	-5,15	10,37	-29,78
22	15	-5,15	15,86	-18,95
23	9	-2,65	9,38	-16,41
24	15	-2,65	15,23	-10,02
25	9	-0,15	9,00	-0,95
26	15	-0,15	15,00	-0,57
27	9	2,35	9,30	14,63
28	15	2,35	15,18	8,90
29	9	4,85	10,22	28,32
30	15	4,85	15,76	17,92
31	15	7,35	16,70	26,10
32	15	9,85	17,94	33,29
33	9	-10,15	13,57	-48,44
34	15	-10,15	18,11	-34,08
35	9	-7,65	11,81	-40,36
36	15	-7,65	16,84	-27,02

Posició nivell inferior			
x (m)	y (m)	radi (m)	beta (º)
24,25	-25	34,83	-45,87
30,25	-22,5	37,70	-36,64
24,25	-17,5	29,91	-35,82
30,25	-15	33,76	-26,38
24,25	-10	26,23	-22,41
36,25	-7,5	37,02	-11,69
24,25	-5	24,76	-11,65
30,25	-2,5	30,35	-4,72
24,25	0	24,25	0,00
30,25	2,5	30,35	4,72
30,25	7,5	31,17	13,92
30,25	5	30,66	9,39
24,25	10	26,23	22,41
36,25	12,5	38,34	19,03
24,25	15	28,51	31,74
24,25	20	31,43	39,51
24,25	-22,5	33,08	-42,86
30,25	-20	36,26	-33,47
24,25	-15	28,51	-31,74
30,25	-12,5	32,73	-22,45
24,25	-7,5	25,38	-17,19
36,25	-10	37,60	-15,42
30,25	-5	30,66	-9,39
36,25	-2,5	36,34	-3,95
30,25	0	30,25	0,00
36,25	2,5	36,34	3,95
24,25	5	24,76	11,65
36,25	7,5	37,02	11,69
24,25	12,5	27,28	27,27
36,25	10	37,60	15,42
30,25	15	33,76	26,38
30,25	17,5	34,95	30,05
24,25	-20	31,43	-39,51
30,25	-17,5	34,95	-30,05
24,25	-12,5	27,28	-27,27
36,25	-12,5	38,34	-19,03

37	9	-5,15	10,37	-29,78	30,25	-10	31,86	-18,29
38	15	-5,15	15,86	-18,95	30,25	-7,5	31,17	-13,92
39	9	-2,65	9,38	-16,41	24,25	-2,5	24,38	-5,89
40	15	-2,65	15,23	-10,02	36,25	-5	36,59	-7,85
41	9	-0,15	9,00	-0,95	36,25	0	36,25	0,00
42	15	-0,15	15,00	-0,57	24,25	2,5	24,38	5,89
43	9	2,35	9,30	14,63	36,25	5	36,59	7,85
44	15	2,35	15,18	8,90	30,25	7,5	31,17	13,92
45	9	4,85	10,22	28,32	30,25	10	31,86	18,29
46	15	4,85	15,76	17,92	30,25	12,5	32,73	22,45
47	15	7,35	16,70	26,10	24,25	17,5	29,91	35,82
48	15	9,85	17,94	33,29	30,25	20	36,26	33,47

Taula 5.13. Posicions corresponents dels blocs en els dos nivells. Font: propi.

A través de les coordenades establertes, la distància radial i angular, s'estudiaran els moviments d'un quadrant tant en fase de càrrega com de descàrrega per així ponderar amb exactitud els temps d'operació de cada desplaçament del capçal així com la seva potència i energia aportada o consumida. Després, es transportaran aquests valors a la resta de capçals per a obtenir la imatge general del consum i posterior entrega energètica de la central.

En l'estudi dels moviments de càrrega i descàrrega, les translacions horitzontals dels blocs segons la correspondència establerta seran de:

N	Posició nivell superior		Posició nivell inferior		Desplaçament (amb contenidor)		Desplaçament (sense contenidor)	
	radi (m)	alpha (°)	radi (m)	beta (°)	Radial (m)	Angular (°)	Radial (m)	Angular (°)
1	13,57	-48,44	34,83	-45,87	21,26	2,56	16,72	11,79
2	18,11	-34,08	37,70	-36,64	19,59	2,56	25,89	3,72
3	11,81	-40,36	29,91	-35,82	18,09	4,55	13,07	8,79
4	16,84	-27,02	33,76	-26,38	16,93	0,65	23,40	3,40
5	10,37	-29,78	26,23	-22,41	15,86	7,37	10,37	3,46
6	15,86	-18,95	37,02	-11,69	21,16	7,26	27,64	4,72
7	9,38	-16,41	24,76	-11,65	15,38	4,76	9,53	1,63
8	15,23	-10,02	30,35	-4,72	15,12	5,29	21,35	3,77
9	9,00	-0,95	24,25	0,00	15,25	0,95	9,25	0,57
10	15,00	-0,57	30,35	4,72	15,35	5,30	21,05	9,91
11	9,30	14,63	31,17	13,92	21,86	0,71	15,98	5,02

12	15,18	8,90	30,66	9,39	15,48	0,48	20,44	18,93
13	10,22	28,32	26,23	22,41	16,01	5,91	10,47	4,49
14	15,76	17,92	38,34	19,03	22,58	1,11	21,64	7,08
15	16,70	26,10	28,51	31,74	11,81	5,63	10,57	1,55
16	17,94	33,29	31,43	39,51	13,49	6,22	17,87	87,95
17	13,57	-48,44	33,08	-42,86	19,51	5,58	14,97	8,77
18	18,11	-34,08	36,26	-33,47	18,15	0,61	24,45	6,89
19	11,81	-40,36	28,51	-31,74	16,70	8,63	11,68	4,72
20	16,84	-27,02	32,73	-22,45	15,89	4,57	22,36	7,33
21	10,37	-29,78	25,38	-17,19	15,01	12,59	9,52	1,76
22	15,86	-18,95	37,60	-15,42	21,74	3,53	28,22	0,98
23	9,38	-16,41	30,66	-9,39	21,28	7,02	15,43	0,63
24	15,23	-10,02	36,34	-3,95	21,10	6,07	27,33	2,99
25	9,00	-0,95	30,25	0,00	21,25	0,95	15,25	0,57
26	15,00	-0,57	36,34	3,95	21,34	4,52	27,03	10,69
27	9,30	14,63	24,76	11,65	15,46	2,98	9,58	2,75
28	15,18	8,90	37,02	11,69	21,83	2,79	26,79	16,63
29	10,22	28,32	27,28	27,27	17,06	1,05	11,52	9,35
30	15,76	17,92	37,60	15,42	21,84	2,50	20,90	10,68
31	16,70	26,10	33,76	26,38	17,06	0,27	15,82	6,92
32	17,94	33,29	34,95	30,05	17,00	3,24	21,38	78,49
33	13,57	-48,44	31,43	-39,51	17,87	8,92	13,32	5,43
34	18,11	-34,08	34,95	-30,05	16,84	4,03	23,14	10,31
35	11,81	-40,36	27,28	-27,27	15,47	13,10	10,44	0,25
36	16,84	-27,02	38,34	-19,03	21,51	8,00	27,98	10,75
37	10,37	-29,78	31,86	-18,29	21,49	11,49	16,00	0,66
38	15,86	-18,95	31,17	-13,92	15,31	5,02	21,78	2,48
39	9,38	-16,41	24,38	-5,89	15,00	10,52	9,15	4,13
40	15,23	-10,02	36,59	-7,85	21,36	2,17	27,59	6,90
41	9,00	-0,95	36,25	0,00	27,25	0,95	21,25	0,57
42	15,00	-0,57	24,38	5,89	9,38	6,46	15,08	8,75
43	9,30	14,63	36,59	7,85	27,29	6,78	21,41	1,05
44	15,18	8,90	31,17	13,92	15,98	5,02	20,94	14,39
45	10,22	28,32	31,86	18,29	21,64	10,03	16,10	0,38
46	15,76	17,92	32,73	22,45	16,97	4,53	16,03	3,65
47	16,70	26,10	29,91	35,82	13,20	9,71	11,96	2,52
48	17,94	33,29	36,26	33,47	18,32	0,18	Cap a següent quadrant	

Taula 5.14. Desplaçaments radials i angulars de les càrregues en una operació model. Font: propi.

En les operacions de càrrega, si es parteix de l'instant en que la torre es troba totalment

descarregada, les primeres operacions aniran transportant blocs des del pis superior del nivell inferior fins al pis inferior del nivell elevat. A mesura que passi el temps, la torre anirà guanyant pisos i per tant alçada, mentre que el nivell inferior anirà perdent-ne a mesura que es va buidant. Quan la central funcioni en descàrrega, passarà exactament el contrari: les primeres operacions seran les de més durada, i aquesta anirà disminuint a mida que es buidi el nivell superior. Cal tenir en compte que aquesta manera d'operar causa que els primers desplaçaments en els moments de càrrega i els últims en els de descàrrega siguin els menys eficients.

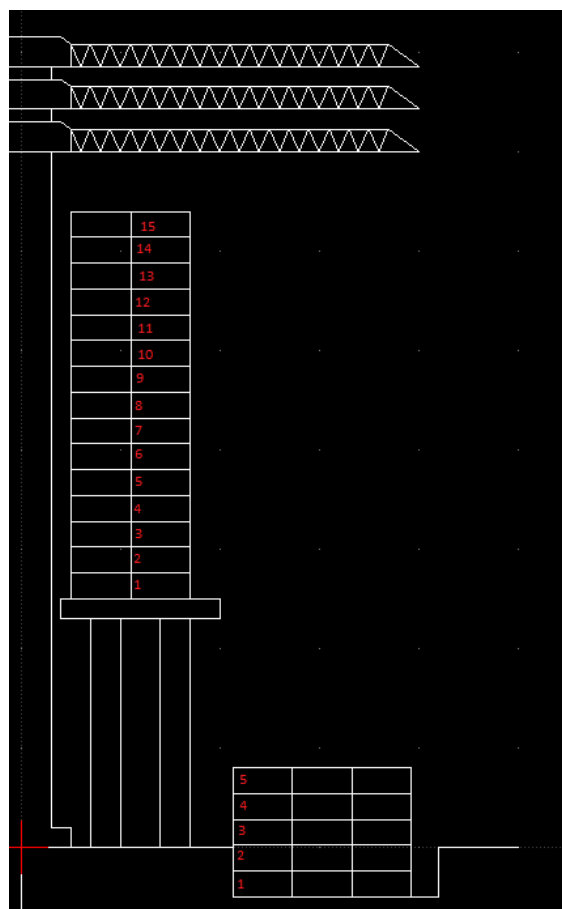


Figura 5.15. Numeració dels pisos en els dos nivells de la central. Font: propi.

Els moviments verticals que s'hauran de portar a terme, seguint la correspondència establerta, seran els següents per als diferents pisos de cada nivell:

Nivell inferior	h inf (m)	Nivell superior corresponent	h sup (m)	h sup - h inf
5	5,4	15	25	19,6
		14	27,6	22,2
		3	30,2	24,8
4	2,8	4	32,8	30
		5	35,4	32,6
		6	38	35,2
3	0,2	7	40,6	40,4
		8	43,2	43
		9	45,8	45,6
2	-2,4	10	48,4	50,8
		11	51	53,4
		12	53,6	56
1	-5	13	56,2	61,2
		14	58,8	63,8
		15	61,4	66,4

Taula 5.16. Relació d'altures entre els nivells recorreguts pels blocs. Font: propi.

De tal manera, la central operarà entre unes altures relatives de 19,6 fins a 61,4 m.

5.3.2. Estudi del moviment combinat dels capçals

La central realitzarà totes les seves operacions a través de 3 braços independents que allotjaran 2 capçals cadascun. Els dos capçals de cada braç hauran de fer exactament les mateixes operacions i trobar-se en la mateixa posició simètrica en tot moment, per tal que la central sigui eficient, ja que a través d'aquest règim de moviment:

- S'estalviaran moviments innecessaris, redundàncies i malfuncions entre els dos capçals.
- No es requerirà una càrrega de contrapès, que només aportaria una pèrdua energètica en els desplaçaments angulars, ja que la distància de la càrrega en cada braç respecte el centre serà igual, per tant el moment flector sobre el braç quedarà compensat.

Per a fer l'estudi cinètic que es porta a terme en aquest projecte, s'agafa com a hipòtesi el cas límit de funcionament en règim de 2 funcionant i 1 en temps mort, de manera que l'input o output rebut o generat per la central sigui constant:

Cicles	1	2	3
Braç 1			
Braç 2			
Braç 3			

Moviment útil
Moviments pèrdues

Figura 5.17. Relació de moviments entre els 3 braços de la instal·lació. Font: propi.

El desfasament entre el moviment dels braços ha d'estar coordinat de tal manera que en qualsevol instant de temps 4 càrregues (2 per braç) estiguin en la seva fase de desplaçament vertical. En el moment que un dels braços estigui fent arribar la seva càrrega a l'altura desitjada, el braç que es trobava reposicionant-se ha de començar a executar el seu moviment vertical. Només d'aquesta manera es pot arribar a captar o oferir una potència constant que permeti l'execució successiva d'operacions.

És cert que durant els primers instants del moviment d'un braç i els últims de l'anterior hi haurà una petita franja de temps en que la potència disminuirà, coincidint amb el moment de canvi de braços operatius. Per a compensar aquest fet, es planteja controlar l'acceleració i desacceleració dels motors-generadors, fent que l'operació del braç que estava fent el moviment de reposició comenci uns instants abans que acabi l'operació del braç que està acabant el seu moviment útil. La resposta energètica seria del tipus:

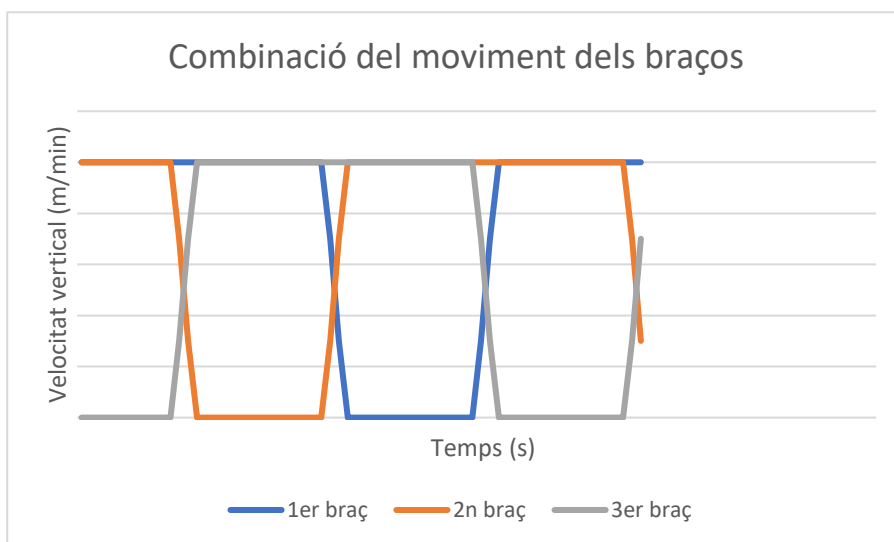


Figura 5.18. Relació de la velocitat de desplaçament vertical entre braços per a assolir un règim de consum o entrega constant. Font: propi.

Funcionant en aquest règim, la potència captada per la central durant els moments de càrrega i oferta en els moments de descàrrega es manté constant i estable en el temps.

Aquesta relació de moviments imposarà una limitació operativa que s'haurà de tenir en compte a l'hora de calcular els desplaçaments en les fases de càrrega i descàrrega, ja que determinarà quin és la velocitat màxima d'operació, per tant, la potència energètica consumida o aportada a cada instant.

5.3.3. Estudi del moviment en càrrega

En els moments que el camp de generació energètica estigui produint més energia del que la xarxa pot absorbir, s'iniciarà el moviment de càrrega dels contenidors del nivell inferior cap al nivell superior. En aquesta operació, la central només actuarà de cara a la xarxa com una càrrega resistent, i n'absorbirà l'energia sobrant a través del guany d'energia potencial rebut pels contenidors. Aquests estaran disposats en rengles tal i com s'explica a l'apartat 6.2.5, i seguiran la correspondència descrita en l'anterior apartat quan siguin transportats del nivell inferior cap al superior.

En la figura XX es poden veure representats els principals moviments que durà a terme un dels braços de la central durant cada operació de càrrega que practiqui.

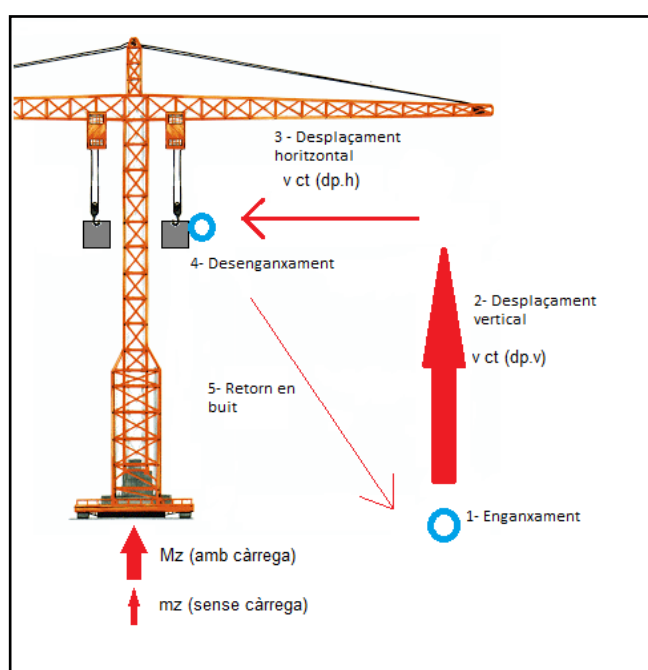


Figura 5.19. Principals operacions en fase de càrrega. Font: propi.

Es poden descriure els diferents desplaçaments que han de fer els motors de la instal·lació durant una operació de càrrega d'un bloc com:

- Ascens a velocitat constant (dp.v): fase d'ascens a velocitat constant, determinada per la potència que es vol estar entregant en cada moment, serà el desplaçament que consumirà energia principalment. Es portarà a terme a través del grup motor-generador principal.
- Translació horitzontal (dp.h): fase de moviment horitzontal i velocitat constant del bloc, consumirà energia per tal de mantenir la velocitat establerta i fer arribar el bloc a la seva posició en el temps requerit. Es portarà a terme a través del motor auxiliar radial.
- Mz (amb càrrega): moviment angular de desplaçament del braç mentre transporta la càrrega horitzontalment, consumirà energia. Es portarà a terme a través del motor axial de la torre grua.
- mz (sense càrrega): moviment angular de desplaçament de reposició del capçal per a situar-se sobre el següent bloc en el nivell inferior, consumirà energia. Es portarà a terme a través del motor axial de la torre grua.
- Retorn capçal (sense càrrega): consum d'energia per a desplaçar horitzontal i verticalment el capçal des de l'últim bloc situat al nivell superior fins a sobre el següent bloc a ser ascendit del nivell inferior. Es portarà a terme combinadament a través del grup motor-generador principal i a través del motor auxiliar radial.

Per a analitzar en detall totes les fases d'aquesta operació, es fa l'estudi detallat del moviment d'un capçal quan hagi de fer ascendir un quadrant del nivell inferior per a formar-ne 3 en el nivell superior.

5.3.3.1. Estudi cinètic i temporal de la càrrega

Com s'ha mencionat a l'apartat xxx, el moviment de desplaçament complet d'un bloc en fase de càrrega (és a dir, des que el capçal agafa el bloc en qüestió del nivell inferior fins que torna a estar en posició d'agafar el següent bloc del nivell inferior a ser carregat), es pot desglossar temporalment en:

$$t_{total} = t_{enganx} + t_{desp.ver} + t_{desp.hor} + t_{desenganx} + t_{següent}$$

Per tant, s'analitzen aquests temps i les fases que es duen a terme en ells detalladament per

a poder assignar-los uns valors realistes, que permetran determinar de manera acurada el rendiment de la instal·lació en fase de càrrega i facilitar l'anàlisi potencial, a través de determinar el seu consum total i els temps on ocorren els consums secundaris, que es comptabilitzaran com a pèrdues.

Fase d'enganxament del bloc (t_{enganx})

Representa el temps que triga el capçal després de l'arribada a la posició inicial en el recorregut del següent bloc i abans de començar a fer la seva translació vertical. En els nivells inferiors no caldrà que el bloc estigui fixat, pel que es podrà agafar més ràpidament.

Es comptabilitza un temps de 3 segons com a suficient per a fer l'enganxament del bloc. No es considera que hi hagi una pèrdua energètica de rellevància durant les fases d'enganxament i desenganxament.

Fase de desplaçament vertical del bloc ($t_{\text{desp.ver}}$)

Serà el temps que trigui el bloc a ascendir des de la seva posició inicial fins a la seva alçada final, punt en el que començarà el seu recorregut horitzontal, i representa l'únic moviment que aportarà un consum útil. Aquest temps augmentarà a mida que es va carregant la instal·lació, des de pujades curtes (ja que ens trobarem en el pis més alt del nivell inferior i anirem cap al més baix del nivell superior) fins a pujades de més alçada per a poder arribar als pisos més alts del nivell superior.

La seva magnitud també dependrà de la velocitat de càrrega en la que estigui operant la central, ja que a més potència que hagi d'absorbir, més velocitat proporcionarà el motor del capçal per a compensar-la. Tenint en compte aquests dos factors, el temps de desplaçament vertical d'un bloc i en fase de càrrega es pot descriure com:

$$t_{\text{desp.ver } i} = \frac{h_{\text{sup } i} - h_{\text{inf } i}}{v_{\text{operació}}}$$

De tal manera, la potència consumida per un bloc en fase de càrrega serà igual a:

$$P_{\text{càrrega}} (W) = m \cdot g \cdot v_{\text{operació}} = 28.000 \cdot 9,8 \cdot v_{\text{operació}} = 274.400 \cdot v_{\text{operació}}$$

L'energia total consumida pel motor durant aquest desplaçament serà igual a:

$$E_{\text{desp.ver } i} = m \cdot g \cdot (h_{\text{sup } i} - h_{\text{inf } i}) = 28.000 \cdot 9,8 \cdot (h_{\text{sup } i} - h_{\text{inf } i}) = 274.400 \cdot (h_{\text{sup } i} - h_{\text{inf } i})$$

Fase de desplaçament horitzontal del bloc ($t_{\text{desp.hor}}$)

De la manera com s'ha dissenyat la correspondència dels blocs entre els dos nivells, no hi ha una distància exacta de desplaçament dels blocs en el seu recorregut horitzontal. Per aquest motiu, s'ha fet la mitjana aritmètica dels desplaçaments horitzontals del quadrant analitzat a l'apartat 6.3.1.

El desplaçament horitzontal mig en una operació de transport de càrrega és de **18,17 m**.

El desplaçament angular mig que ha de fer el motor rotatiu del braç és de **4,9 °**.

Tenint en compte que s'emprarà un motor que és capaç d'assolir grans velocitats i que la instal·lació estaria específicament dissenyada per a tal fi, el temps de desplaçament horitzontal dels blocs $t_{\text{desp.hor}}$ assolint velocitats de l'ordre de 2,5 m/s serà de:

$$t_{\text{desp.hor}} = \frac{\Delta x}{v_{\text{horitzontal}}} = \frac{18,17}{2,5} = 7,27 \text{ s}$$

Si establim una equivalència amb el motor de moviment horitzontal de la torre grua original (veure Annex 01. Fitxes Tècniques) que aconseguia un moviment de 1,13 m/s per a les càrregues comptant amb 11 kW de potència, el motor que s'hauria d'instal·lar seria d'aproximadament 25 kW.

Amb el motor rotatiu del que disposen les torres grua de referència ja es gira a prou velocitat com per no superar el temps de desplaçament radial, ja que comptant que es capaç de fer un gir de 0,6 voltes/min, es recorre la diferència angular de 4,9 ° en 2,5 s. S'agafarà com a dada el temps de desplaçament radial ja que és més limitant. Recordem, però, que cada grua comptarà amb dos braços útils, pel que assignarem la meitat del consum del motor axial per a l'estudi del moviment d'un sol capçal, ja que la resta es comptabilitzarà pel moviment de l'altre capçal.

La potència consumida en els instants que la grua s'estigui desplaçant angularment i la càrrega estigui movent-se radialment:

$$P_{\text{desp.hor}} (W) = P_{\text{motor radial}} + \frac{P_{\text{motor axial}}}{2}$$

I en els instants que només s'estigui desplaçant sobre l'eix del braç:

$$P_{\text{desp.hor}} (W) = P_{\text{motor radial}}$$

Tanmateix, els dos motors no funcionaran alhora durant tot el moviment. Recordem que el motor radial operarà 7 s i el motor axial només 2,5 s, pel que es fa més adient calcular el consum energètic mig durant les operacions de desplaçament horitzontal, que es caracteritzarà com a:

$$E_{desp.hor} (J) = P_{motor\ radial} \cdot t_{radial} + \frac{P_{axial}}{2} \cdot t_{axial} = 25000\ W \cdot 7,27\ s + \frac{3 \cdot 11000\ W}{2} \cdot 2,5\ s$$

$$= 223.000\ J$$

Combinació de moviments vertical i horitzontal

Els moviments horitzontal i vertical descrits produirien els temps mencionats sempre i quan funcionessin com dos fases diferents. Per tal de fer més eficient la instal·lació reduint el temps total de cicle, es pot començar a fer el moviment horitzontal de posicionament abans que acabi el moviment d'ascensió, ja que sempre existirà una certa distància entre la projecció vertical de la posició inferior del bloc i el límit geomètric dels blocs acumulats en el nivell superior.

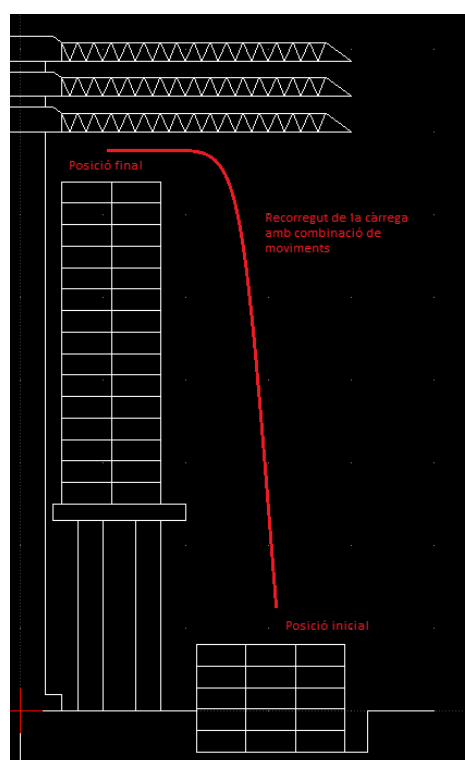


Figura 5.20. Desplaçament de la càrrega amb combinació de moviments. Font: propi.

Es pot veure, doncs, que la distància mitja en l'eix x entre l'eix vertical d'ascensió dels blocs situats al nivell inferior i el límit geomètric dels blocs en el nivell superior es manté constant en tots els nivells. Tanmateix, cada bloc ubicat en el nivell inferior té la seva pròpia distància respecte aquest límit. Per no allargar innecessàriament el càlcul s'agafarà la distància mitja

dels blocs en el nivell inferior respecte el límit per a conèixer la distància de desplaçament horitzontal que es portarà a terme durant el moviment vertical.

La distància mitja dels blocs situats en el nivell inferior seria de **31,94 m**.

El límit geomètric del pis superior seria un quadrat de 36 x 36 m amb el seu centre a l'eix central. La seva distància en els eixos principals seria de 18 m, encara que no serà regular.

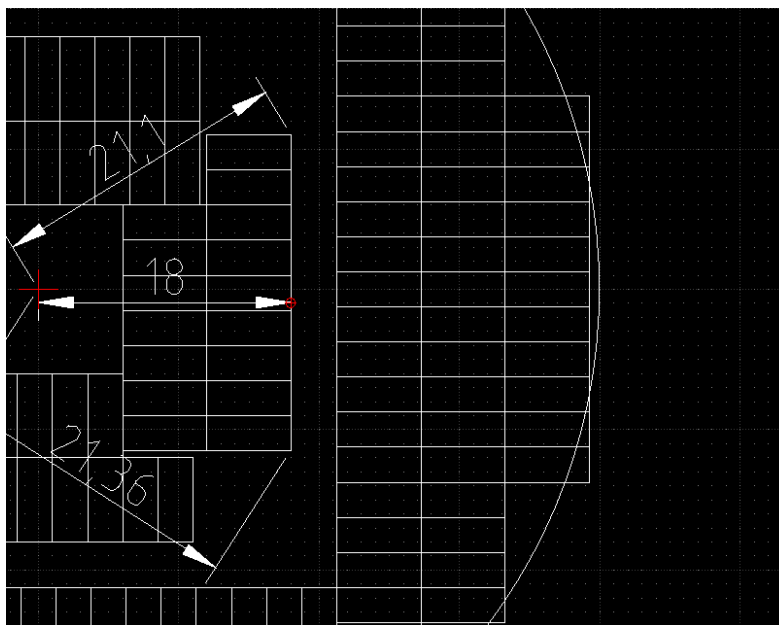


Figura 5.21. Límit geomètric del nivell superior. Font: propi.

Així doncs, es pren una distància de límit per als blocs d'aproximadament **20 m** respecte l'eix central de la instal·lació.

D'aquesta manera, dels habituals 18,17 m que hauria de recórrer la càrrega horitzontalment, 11,94 m horitzontals es poden superar durant la fase de desplaçament vertical. Per tant, el desplaçament horitzontal quan la càrrega ja ha ascendit a la seva altura objectiu és de 6,23 m. Si s'opera la central combinant les dues operacions, el temps final de pur desplaçament horitzontal és de **3,11 s** si s'opera el motor de desplaçament radial a la seva potència nominal.

El desplaçament angular del braç per a cada operació es pot fer durant tot el moviment de càrrega i de desplaçament horitzontal, pel que no limita de cap manera el temps de la fase. Pel que fa a l'anàlisi energètic, es considera que no es produeix una diferència significativa respecte al mode d'operació no combinat, ja que no es modifiquen les distàncies a recórrer, només es redueix el temps total d'operació, cosa que repercutirà positivament en el número

d'operacions que pot fer la central en el mateix període de temps.

Fase de desenganxament del bloc ($t_{desenganx}$)

Representa el temps que triga el capçal després de l'arribada a la posició final en el recorregut del bloc i abans de començar a fer el seu retorn sense càrrega al pis inferior. Com que ens trobarem en el nivell superior, el desenganxament del bloc haurà de ser més lent ja que s'haurà de donar un cert temps a les fixacions per activar-se.

Es considera un temps de 5 segons per a tota l'operació de desenganxament i fixació del bloc.

Fase de desplaçament al següent bloc ($t_{següent}$)

Representa el temps que trigarà el capçal a recorre la distància horitzontal i vertical que el separen del següent bloc que s'haurà de carregar des del pis inferior. És de vital importància que aquest moviment sigui ràpid, ja que d'això en dependrà la velocitat en que es podrà iniciar el següent moviment. El temps que es trigarà a fer aquest moviment també dependrà de l'altura inicial i final de cada bloc.

La instal·lació haurà d'estar preparada per a poder moure el capçal a gran velocitat, arribant a poder desplaçar-se a velocitats de l'ordre de 10 m/s per tal de recorre la gran distància que separa els nivells en un temps acceptable per a poder portar a terme les consecutives operacions de la central. Prenent aquesta velocitat com a referència, i coneixent el desplaçament horitzontal mig en les operacions de retorn extret de la taula 5.14 (que és de 6,23 m si es té en compte la distància horitzontal que es pot recórrer durant la fase vertical), el temps de desplaçament del capçal al següent bloc serà de:

$$t_{següent i} = \frac{(h_{sup i} - h_{inf i}) + 6,23 \text{ m}}{10 \text{ m/s}}$$

Davant les dificultats tècniques existents per tal de determinar una potència i una energia consumides concretes durant els moviments del capçal sense càrrega, s'estima que aquest moviment consumirà un 4 % de l'energia absorbida per un cicle de càrrega.

$$E_{retorn} = 0,04 \cdot E_{absorbida}$$

Un cop analitzats detalladament els anteriors temps, determinats els seus principals consums energètics i potencials, es divideixen els moviments entre els que generen un consum útil (aporten alçada als contenidors) i els que provoquen un consum en forma de pèrdues.

$$t_{total} = t_{útil} + t_{pèrdues}$$

$$t_{\text{útil}} = t_{\text{desp.ver}}$$

$$t_{\text{pèrdues}} = t_{\text{enganx}} + t_{\text{desp.hor}} + t_{\text{desenganx}} + t_{\text{següent}}$$

Veiem que tan sols durant el moviment de càrrega vertical estarem aportant un treball útil de cara a l'emmagatzematge d'energia. Tanmateix, el temps més limitant de cara a la instal·lació i la seva capacitat d'operació vindrà donat pel temps $t_{\text{pèrdues}}$, ja que segons el règim de funcionament que es volia seguir, amb operació constant mínima de 2 braços (4 capçals), és de vital importància que es puguin portar a terme 2 operacions de $t_{\text{pèrdues}}$ mentre se'n fa una de $t_{\text{útil}}$. Només d'aquesta manera es podrà assegurar la bona sincronia entre les operacions dels diferents braços i l'estabilitat en el consum energètic.

Per tal de poder establir un valor de referència en els temps morts d'operació de cada braç, s'inclouen els valors i equacions de cadascun en el còmput del $t_{\text{pèrdues}}$.

$$\begin{aligned} t_{\text{pèrdues}} &= t_{\text{enganx}} + t_{\text{desp.hor}} + t_{\text{desenganx}} + t_{\text{següent}} = \\ &= 3 \text{ s} + 3,11 \text{ s} + 5 \text{ s} + \frac{(h_{\text{supi}} - h_{\text{infi}}) + 6,23}{10 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 11,73 \text{ s} + \frac{(h_{\text{supi}} - h_{\text{infi}})}{10 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \end{aligned}$$

Per tant doncs, el temps mort total dependrà en certa mesura de l'alçada en la que s'estigui operant. A continuació es presenten els temps morts exactes per a cada pis a carregar en el nivell superior, i les velocitats màximes de moviment per a cada pis si es vol mantenir el règim de 2-1 (és a dir, que un temps mort ha de ser com a màxim la meitat de temps d'un desplaçament vertical).

Nivell inferior		Nivell superior		Δh (m)	t pèrdues (s)	t mínim càrrega (s)	v màxima operació (m/min)	Temps mínim de cycle (s)
Pis	h (m)	Pis	h (m)					
5	5,4	1	25	19,6	13,69	27,38	42,95	41,07
5	5,4	2	27,6	22,2	13,95	27,9	47,74	41,85
5	5,4	3	30,2	24,8	14,21	28,42	52,36	42,63
4	2,8	4	32,8	30	14,73	29,46	61,10	44,19
4	2,8	5	35,4	32,6	14,99	29,98	65,24	44,97
4	2,8	6	38	35,2	15,25	30,5	69,25	45,75
3	0,2	7	40,6	40,4	15,77	31,54	76,85	47,31
3	0,2	8	43,2	43	16,03	32,06	80,47	48,09
3	0,2	9	45,8	45,6	16,29	32,58	83,98	48,87

2	-2,4	10	48,4	50,8	16,81	33,62	90,66	50,43
2	-2,4	11	51	53,4	17,07	34,14	93,85	51,21
2	-2,4	12	53,6	56	17,33	34,66	96,94	51,99
1	-5	13	56,2	61,2	17,85	35,7	102,86	53,55
1	-5	14	58,8	63,8	18,11	36,22	105,69	54,33
1	-5	15	61,4	66,4	18,37	36,74	108,44	55,11

Taula 5.22. temps de cicle mínim i velocitat màxima d'operació per nivell. Font: propi.

Cal dir que es pot operar amb velocitats inferiors a les presentades, ja que llavors s'assegurarà que durant el moviment de càrrega d'un capçal, els altres dos han pogut fer els seus moviments de consum. Si hi ha temps addicional per a fer un moviment, el capçal s'esperarà amb el seu bloc ja fixat per a començar el moviment d'ascensió tan bon punt l'anterior capçal hagi ascendit el seu bloc fins a l'alçada objectiu i comenci la seva fase de consum.

5.3.3.2. Estudi energètic i potencial de la càrrega

Com s'ha pogut veure en l'apartat anterior, cada operació de càrrega d'un contenidor té associats uns consums energètics no negligibles, que afecten negativament el rendiment de l'emmagatzematge energètic, ja que consumeixen energia de la xarxa per a fer funcionar la central.

S'analitza en detall el consum energètic per pis d'un capçal, per tal d'extrapolar el rendiment a la resta de la instal·lació, que en ser integrada per un total de 6 unitats (cada capçal) iguals, tindrà el mateix valor.

L'energia captada per la instal·lació en fase de càrrega es dividirà en energia útil (desplaçament vertical contenidor) i en energia en forma de pèrdues (resta de desplaçaments amb consum propi):

$$E_{absorbida} = E_{útil} + E_{pèrdues}$$

$$E_{útil} = E_{desp.ver i} = 274.400 \cdot (h_{sup i} - h_{inf i})$$

$$E_{pèrdues} = E_{desp.hor} + E_{retorn} = 223.000 + 0,04 \cdot E_{útil}$$

D'aquesta manera, els moviments de contenidors del nivell inferior al superior tindran associada una generació energètica i una pèrdua d'energia de:

N/pis	Nivell inferior		Nivell superior		Δh (m)	E útil (MJ)	E pèrdues (MJ)	E absorbida total (MJ)
	Pis	h (m)	Pis	h (m)				
64	5	5,4	1	25	19,6	344,21	27,61	371,82

64	5	5,4	2	27,6	22,2	389,87	29,43	419,30
64	5	5,4	3	30,2	24,8	435,53	31,26	466,79
64	4	2,8	4	32,8	30	526,85	34,91	561,76
64	4	2,8	5	35,4	32,6	572,51	36,74	609,25
64	4	2,8	6	38	35,2	618,17	38,57	656,74
64	3	0,2	7	40,6	40,4	709,49	42,22	751,71
64	3	0,2	8	43,2	43	755,15	44,05	799,19
64	3	0,2	9	45,8	45,6	800,81	45,87	846,68
64	2	-2,4	10	48,4	50,8	892,13	49,53	941,65
64	2	-2,4	11	51	53,4	937,79	51,35	989,14
64	2	-2,4	12	53,6	56	983,45	53,18	1036,63
64	1	-5	13	56,2	61,2	1074,77	56,83	1131,60
64	1	-5	14	58,8	63,8	1120,43	58,66	1179,09
64	1	-5	15	61,4	66,4	1166,09	60,48	1226,57

Taula 5.23. Energia total emmagatzemada en fase de càrrega. Font: propi.

Veiem doncs, que el total d'energia que es pot emmagatzemar al nivell superior és de **11.327,33 MJ**, consumint una energia total en la xarxa de **11.987,92 MJ**.

El rendiment energètic mecànic en fase de càrrega serà de:

$$\eta_{càrrega} = \frac{E_{útil}}{E_{consumida}} \cdot 100 = \frac{11327,23}{11987,92} \cdot 100 = 94,49 \%$$

Si suposem que la central opera a les condicions límit per a la sincronia 2-1, i tenim en compte que a cada instant estaran funcionant aportant treball útil només 4 dels 6 capçals, la potència màxima consumida per la central per cadascun dels pisos a omplir en el nivell superior és:

N/pis	Nivell inferior		Nivell superior		Δh (m)	v màxima operació (m/min)	P consumida útil kW
	Pis	h (m)	Pis	h (m)			
64	5	5,4	1	25	19,6	42,95	785,72
64	5	5,4	2	27,6	22,2	47,74	873,36
64	5	5,4	3	30,2	24,8	52,36	957,79
64	4	2,8	4	32,8	30	61,10	1117,72
64	4	2,8	5	35,4	32,6	65,24	1193,52
64	4	2,8	6	38	35,2	69,25	1266,74
64	3	0,2	7	40,6	40,4	76,85	1405,93
64	3	0,2	8	43,2	43	80,47	1472,14

64	3	0,2	9	45,8	45,6	83,98	1536,24
64	2	-2,4	10	48,4	50,8	90,66	1658,48
64	2	-2,4	11	51	53,4	93,85	1716,81
64	2	-2,4	12	53,6	56	96,94	1773,39
64	1	-5	13	56,2	61,2	102,86	1881,60
64	1	-5	14	58,8	63,8	105,69	1933,38
64	1	-5	15	61,4	66,4	108,44	1983,69

Taula 5.24. Potència útil màxima en fase de càrrega. Font: propi.

Veiem doncs que la potència útil màxima consumida dependrà del nivell que estigui sent carregat en cada instant. Aquesta característica de la central serà molt rellevant de cara a la planificació d'operacions, ja que s'haurà de tenir en compte el nivell de càrrega de la central i la previsió d'energia sobrant.

5.3.4. Estudi del moviment en descàrrega

En els moments que la xarxa necessiti més energia de la que conté, s'iniciarà el moviment de descàrrega dels contenidors del nivell superior cap al nivell inferior. En aquesta operació, la central actuarà de cara a la xarxa com una font de generació, i hi abocarà l'energia emmagatzemada a través de la transformació de l'energia potencial dels blocs en energia elèctrica, a través de la conversió del motor a generador. Aquests estaran disposats en rengles tal i com s'explica a l'apartat 6.2.5, i seguiran la correspondència descrita en l'anterior apartat quan siguin transportats del nivell inferior cap al superior.

Per tal de valorar la producció i rendiment que tindrà la central funcionant en descàrrega, es fa un estudi adequat dels desplaçaments als que estaran subjectes els blocs en cadascun dels moviments que realitzaran durant la seva operació, així com el resultat de la interacció entre els braços.

En la figura XX es poden veure representats els principals moviments que durà a terme un dels braços de la central durant cada operació de descàrrega que practiqui.

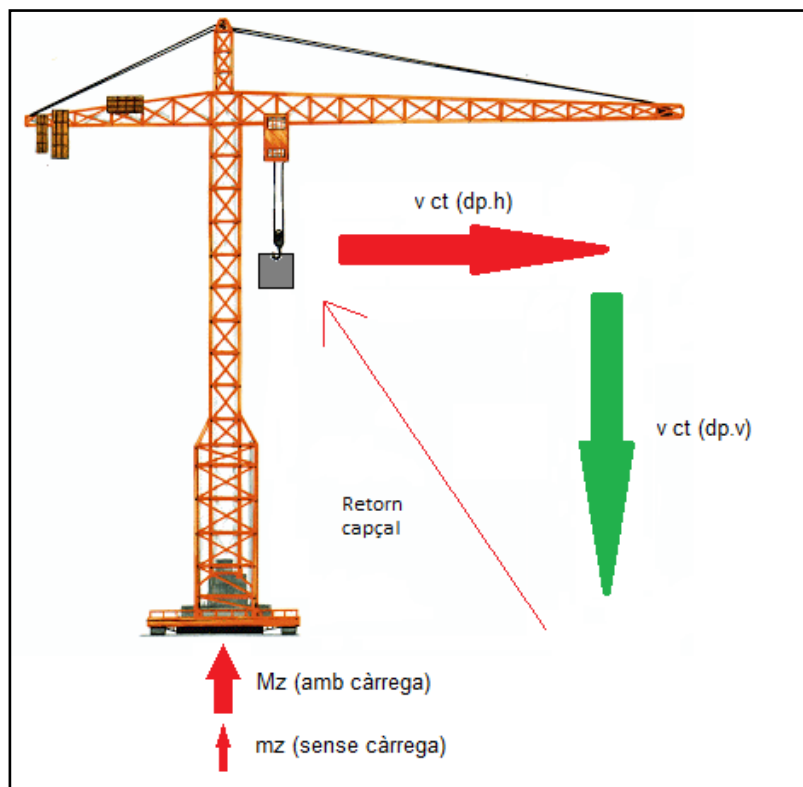


Figura 5.25. Principals operacions en fase de descàrrega. Font: propi.

Es poden descriure els diferents desplaçaments de l'operació com:

- Translació horitzontal (dp.h): fase de moviment horitzontal i velocitat constant del bloc, consumirà energia per tal de mantenir la velocitat establerta i fer arribar el bloc a la seva posició en el temps requerit. Es portarà a terme a través del motor auxiliar radial.
- Descens a velocitat constant (dp.v): fase de descens a velocitat constant, determinada per la potència que es vol estar entregant en cada moment, serà l'únic desplaçament que aportarà. Es portarà a terme a través del grup motor-generador principal.
- M_z (amb càrrega): moviment angular de desplaçament del braç mentre transporta la càrrega horitzontalment, consumirà energia. Es portarà a terme a través del motor axial de la torre grua.
- m_z (sense càrrega): moviment angular de desplaçament de reposició del capçal per a situar-se sobre el següent bloc en el nivell inferior, consumirà energia. Es portarà a

terme a través del motor axial de la torre grua.

- Retorn capçal (sense càrrega): consum d'energia per a desplaçar vertical i horitzontalment el capçal des de l'últim bloc situat al nivell superior fins a sobre el següent bloc a ser ascendit del nivell inferior. Es portarà a terme combinadament a través del grup motor-generator principal i a través del motor auxiliar radial.

5.3.4.1. Estudi cinètic i temporal de la descàrrega

Com s'ha mencionat a l'apartat xxx, el moviment de desplaçament complet d'un bloc en fase de descàrrega (és a dir, des que el capçal agafa el bloc en qüestió del nivell superior fins que torna a estar en posició d'agafar el següent bloc del nivell superior a ser descarregat), es pot desglossar temporalment en:

$$t_{total} = t_{enganx} + t_{desp.hor} + t_{desp.ver} + t_{desenganx} + t_{següent}$$

Per tant, s'analitzen aquests temps i les fases que es duen a terme en ells detalladament per a poder assignar-los uns valors realistes, que permetran determinar de manera acurada el rendiment de la instal·lació en fase de descàrrega i facilitar l'anàlisi potencial, a través de determinar la seva generació total i els temps on ocorren els consums secundaris de funcionament, que es comptabilitzaran com a pèrdues.

Fase d'enganxament del bloc (t_{enganx})

Representa el temps que triga el capçal després de l'arribada a la posició inicial en el recorregut del següent bloc i abans de començar a fer la seva translació horitzontal cap al punt de baixada. És de vital importància que el sistema de subjeccions del bloc tingui un funcionament segur i ràpid, i es pugui desconnectar tan bon punt el capçal recull el contenidor.

Aquest temps inclou una petita ascensió del contenidor a uns 20 cm del nivell on estava reposant per tal de facilitar la seva translació.

Es comptabilitza un temps de 6 segons com a suficient per a fer l'enganxament del bloc.

Fase de desplaçament horitzontal del bloc ($t_{desp.hor}$)

Com que la correspondència entre pisos es manté igual que a la càrrega, les distàncies a recórrer radial i angularment són les mateixes. Anàlogament al desplaçament horitzontal dels contenidors en fase de càrrega:

El desplaçament horitzontal mig en una operació és de **18,17 m**.

El desplaçament angular mig que ha de fer el motor rotatiu del braç és de **4,9 °**.

El temps de desplaçament horitzontal dels blocs $t_{\text{desp.hor}}$ es prendrà com a **7 s**.

En el cas de la potència i energia consumides, es consideren iguals que en el cas de la càrrega:

$$P_{\text{desp.hor}} (W) = P_{\text{motor radial}} + \frac{P_{\text{motor axial}}}{2}$$

$$\begin{aligned} E_{\text{desp.hor}} (J) &= P_{\text{motor radial}} \cdot t_{\text{radial}} + \frac{P_{\text{axial}}}{2} \cdot t_{\text{axial}} = 25000 \text{ W} \cdot 7 \text{ s} + \frac{3 \cdot 11000 \text{ W}}{2} \cdot 2,5 \text{ s} \\ &= 223.000 \text{ J} \end{aligned}$$

Fase de desplaçament vertical del bloc ($t_{\text{desp.ver}}$)

Serà el temps que trigui el bloc a ascendir des de la seva posició inicial fins a la seva alçada final, punt en el que començarà el seu recorregut horitzontal. Aquest temps augmentarà a mida que es va carregant la instal·lació, des de pujades curtes (ja que ens trobarem en el pis més alt del nivell inferior i anirem cap al més baix del nivell superior) fins a pujades de més alçada per a poder arribar als pisos més alts del nivell superior.

La seva magnitud també dependrà de la velocitat de descàrrega en la que estigui operant la central, ja que a més potència que hagi d'abocar a la xarxa, més velocitat requerirà el generador per a compensar-la. Tenint en compte aquests dos factors, el temps de desplaçament vertical d'un bloc i en fase de càrrega es pot descriure com:

$$t_{\text{desp.ver } i} = \frac{h_{\text{sup } i} - h_{\text{inf } i}}{v_{\text{operació}}}$$

De tal manera, la potència aportada per un bloc en fase de descàrrega serà igual a:

$$P_{\text{descàrrega}} (W) = m \cdot g \cdot v_{\text{operació}} = 28.000 \cdot 9,8 \cdot v_{\text{operació}} = 274.400 \cdot v_{\text{operació}}$$

L'energia total aportada per la baixada de la càrrega durant aquest desplaçament serà:

$$E_{\text{desp.ver } i} = m \cdot g \cdot (h_{\text{sup } i} - h_{\text{inf } i}) = 28.000 \cdot 9,8 \cdot (h_{\text{sup } i} - h_{\text{inf } i}) = 274.400 \cdot (h_{\text{sup } i} - h_{\text{inf } i})$$

Combinació de moviments vertical i horitzontal

Els moviments horitzontal i vertical descrits produïrien els temps mencionats sempre i quan

funcionessin com dos fases diferents. Per tal de fer més eficient la instal·lació reduint el temps total de cicle, es pot començar a fer el moviment vertical abans que s'acabi l'horitzontal tan bon punt la càrrega hagi superat l'últim contenidor més allunyat de l'eix central en el pis superior per a cada operació.

Tal i com passa a la fase de càrrega, dels habituals 18,17 m que hauria de recórrer la càrrega horitzontalment, 11,94 m horitzontals es poden superar durant la fase de desplaçament vertical. Per tant, el desplaçament horitzontal quan la càrrega ja ha ascendit a la seva altura objectiu és de 6,23 m. Si s'opera la central combinant les dues operacions, el temps final de pur desplaçament horitzontal és de **3,11 s** si s'opera el motor de desplaçament radial a la seva potència nominal.

Temps de desenganxament del bloc ($t_{\text{desenganx}}$)

Representa el temps que triga el capçal després de l'arribada a la posició final en el recorregut del bloc i abans de començar a fer el seu retorn sense càrrega cap al pis superior. Com que ens trobarem en el nivell inferior, el desenganxament del bloc podrà ser més ràpid ja que no caldrà activar el sistema de fixació.

Es considera un temps de 3 segons per a l'operació de desenganxament del bloc.

Temps de desplaçament al següent bloc ($t_{\text{següent}}$)

Representa el temps que trigarà el capçal a recorre la distància vertical i horitzontal que el separen del següent bloc que s'haurà de descarregar des del pis superior. És de vital importància que aquest moviment sigui ràpid, ja que d'això en dependrà la velocitat en que es podrà iniciar el següent moviment. El temps que es trigarà a fer aquest moviment, tal com en la càrrega, dependrà de l'altura inicial i final de cada bloc.

Si tenim en compte les mateixes hipòtesis que s'han plantejat per al cas de la càrrega, i respectant la correspondència establerta entre blocs, el temps de l'operació es defineix idènticament al trobat en l'estudi de la fase de càrrega.

$$t_{\text{següent } i} = \frac{(h_{\text{sup } i} - h_{\text{inf } i}) + 6,23}{10 \text{ m/s}}$$

De la mateixa manera, es considera que aquest moviment consumirà aproximadament un 4% de l'energia generada. Notem que en aquest cas no es compensarà la pèrdua a través de la xarxa, sinó a través de la pròpia energia generada per la baixada de la càrrega, pel que s'haurà de comptabilitzar adequadament en el rendiment total de la central.

$$E_{\text{retorn}} = 0,04 \cdot E_{\text{generada}}$$

Un cop analitzats detalladament els anteriors temps, determinats els seus principals consums energètics i potencials, es divideixen els moviments entre els que generen energia útil i els que provoquen un consum en forma de pèrdues operatives.

$$t_{total} = t_{útil} + t_{pèrdues}$$

$$t_{útil} = t_{desp.ver}$$

$$t_{pèrdues} = t_{enganx} + t_{desp.hor} + t_{desenganx} + t_{següent}$$

De la mateixa manera que en les operacions de càrrega, el temps més limitant de cara a la instal·lació i la seva capacitat d'operació vindrà donat pel temps $t_{pèrdues}$, ja que segons el règim de funcionament que es volia seguir, amb operació constant mínima de 2 braços (4 capçals), és de vital importància que es puguin portar a terme 2 operacions de $t_{pèrdues}$ mentre se'n fa una de $t_{útil}$.

Per tal de poder establir un valor de referència en els temps morts d'operació de cada braç en una operació de descàrrega, s'inclouen els valors i equacions de cadascun en el còmput del $t_{pèrdues}$.

$$\begin{aligned} t_{pèrdues} &= t_{enganx} + t_{desp.hor} + t_{desenganx} + t_{següent} = \\ &= 6 \text{ s} + 3,11 \text{ s} + 3 \text{ s} + \frac{(h_{supi} - h_{infi}) + 6,23}{10 \frac{m}{s}} = 12,73 \text{ s} + \frac{(h_{supi} - h_{infi})}{10 \frac{m}{s}} \end{aligned}$$

Per tant doncs, el temps mort total dependrà en certa mesura de l'alçada en la que s'estigui operant. A continuació es presenten els temps morts exactes per a cada pis a descarregar del nivell superior, i les velocitats màximes de moviment per a cada pis si es vol mantenir el règim de 2-1.

N/pis	Nivell superior		Nivell inferior		Δh (m)	t pèrdues (s)	t mínima cycle (s)	v màxima operació (m/min)
	Núm	h (m)	Núm	h (m)				
64	15	61,4	1	-5	66,4	19,37	38,74	102,84
64	14	58,8	1	-5	63,8	19,11	38,22	100,16
64	13	56,2	1	-5	61,2	18,85	37,7	97,40
64	12	53,6	2	-2,4	56	18,33	36,66	91,65
64	11	51	2	-2,4	53,4	18,07	36,14	88,66
64	10	48,4	2	-2,4	50,8	17,81	35,62	85,57

64	9	45,8	3	0,2	45,6	17,29	34,58	79,12
64	8	43,2	3	0,2	43	17,03	34,06	75,75
64	7	40,6	3	0,2	40,4	16,77	33,54	72,27
64	6	38	4	2,8	35,2	16,25	32,5	64,98
64	5	35,4	4	2,8	32,6	15,99	31,98	61,16
64	4	32,8	4	2,8	30	15,73	31,46	57,22
64	3	30,2	5	5,4	24,8	15,21	30,42	48,92
64	2	27,6	5	5,4	22,2	14,95	29,9	44,55
64	1	25	5	5,4	19,6	14,69	29,38	40,03

Taula 5.26. Temps de cicle mínim i velocitat màxima d'operació en fase de descàrrega. Font: propi

De la mateixa manera que en el cas de la càrrega, la central pot operar amb velocitats inferiors a les presentades, ja que llavors s'assegurarà que durant el moviment de descàrrega d'un capçal, els altres dos han pogut fer els seus moviments de consum. Si hi ha temps addicional per a fer un moviment, el capçal s'esperarà amb el seu bloc al final del seu desplaçament horitzontal per a començar el seu moviment de descens tan bon punt l'anterior capçal hagi deixat el seu bloc al nivell inferior i comenci la seva fase de consum.

5.3.4.2. Estudi energètic i potencial de la descàrrega

S'analitza en detall l'entrega energètica i els consums de funcionament per pis d'un capçal, per tal d'extrapolar el rendiment a la resta de la instal·lació, que en ser integrada per un total de 6 unitats (cada capçal) iguals, tindrà el mateix valor en conjunt.

L'energia emmagatzemada en el nivell superior en fase de càrrega es descarregarà, transformant la seva energia potencial en energia mecànica i després elèctrica, dividint-se en energia útil (desplaçament vertical contenidor) i en energia en forma de pèrdues (resta de desplaçaments amb consum propi):

$$E_{emmagatzemada} = E_{abocada} + E_{pèrdues}$$

$$E_{abocada} = E_{emmagatzemada} - E_{pèrdues}$$

$$E_{emmagatzemada} = E_{desp.ver} = 274.400 \cdot (h_{sup} - h_{inf})$$

$$E_{pèrdues} = E_{desp.hor} + E_{retorn} = 216.250 + 0,04 \cdot E_{emmagatzemada}$$

$$\begin{aligned} E_{abocada} &= E_{emmagatzemada} - (216.250 + 0,04 \cdot E_{emmagatzemada}) \\ &= 0,96 \cdot E_{emmagatzemada} - 216.250 \end{aligned}$$

D'aquesta manera, els moviments de contenidors del nivell superior cap a l'inferior tindran associada una generació energètica i una pèrdua d'energia de:

N/pis	Nivell superior		Nivell inferior		Δh (m)	E emmagatzemada (MJ)	E pèrdues (MJ)	E abocada total (MJ)
	Núm	h (m)	Núm	h (m)				
64	15	61,4	1	-5	66,4	1166,09	60,92	1105,17
64	14	58,8	1	-5	63,8	1120,43	59,09	1061,34
64	13	56,2	1	-5	61,2	1074,77	57,26	1017,51
64	12	53,6	2	-2,4	56	983,45	53,61	929,84
64	11	51	2	-2,4	53,4	937,79	51,78	886,01
64	10	48,4	2	-2,4	50,8	892,13	49,96	842,17
64	9	45,8	3	0,2	45,6	800,81	46,30	754,50
64	8	43,2	3	0,2	43	755,15	44,48	710,67
64	7	40,6	3	0,2	40,4	709,49	42,65	666,84
64	6	38	4	2,8	35,2	618,17	39,00	579,17
64	5	35,4	4	2,8	32,6	572,51	37,17	535,34
64	4	32,8	4	2,8	30	526,85	35,35	491,50
64	3	30,2	5	5,4	24,8	435,53	31,69	403,83
64	2	27,6	5	5,4	22,2	389,87	29,87	360,00
64	1	25	5	5,4	19,6	344,21	28,04	316,17
TOTAL						11327,23	667,17	10660,06

Taula 5.27. Energia total abocada en fase de descàrrega. Font: propi.

Veiem doncs, que el total d'energia emmagatzemada al nivell superior (**11.327,33 MJ**), es pot arribar a abocar a la xarxa un total de **10.660,06 MJ**.

El rendiment energètic mecànic en fase de descàrrega serà de:

$$\eta_{descàrrega} = \frac{E_{abocada}}{E_{emmagatzemada}} \cdot 100 = \frac{10.660,06}{11327,23} \cdot 100 = 94,11 \%$$

Si suposem que la central opera a les condicions límit per a la sincronia 2-1, i tenim en compte que a cada instant estaran funcionant aportant treball útil només 4 dels 6 capçals, la potència màxima aportada per la central per cadascun dels pisos a buidar del nivell superior és:

N/pis	Nivell superior		Nivell inferior		Δh (m)	v màxima operació (m/min)	P generada útil (kW)
	Núm	h (m)	Núm	h (m)			
64	15	61,4	1	-5	66,4	102,84	1881,28
64	14	58,8	1	-5	63,8	100,16	1832,21
64	13	56,2	1	-5	61,2	97,40	1781,78
64	12	53,6	2	-2,4	56	91,65	1676,64
64	11	51	2	-2,4	53,4	88,66	1621,80
64	10	48,4	2	-2,4	50,8	85,57	1565,36
64	9	45,8	3	0,2	45,6	79,12	1447,38
64	8	43,2	3	0,2	43	75,75	1385,70
64	7	40,6	3	0,2	40,4	72,27	1322,09
64	6	38	4	2,8	35,2	64,98	1188,79
64	5	35,4	4	2,8	32,6	61,16	1118,88
64	4	32,8	4	2,8	30	57,22	1046,66
64	3	30,2	5	5,4	24,8	48,92	894,82
64	2	27,6	5	5,4	22,2	44,55	814,94
64	1	25	5	5,4	19,6	40,03	732,23

Taula 5.28. Potència abocada màxima en fase de descàrrega. Font: propi.

Veiem doncs que la potència útil màxima abocada a la xarxa dependrà del nivell que estigui sent descarregat en cada instant. Aquesta característica de la central serà molt rellevant de cara a la planificació d'operacions, ja que s'haurà de tenir en compte la demanda energètica en hores vall, i per a l'elecció d'un motor elèctric adequat per a treballar en els règims més habituals.

5.4. Disseny de les instal·lacions elèctriques

En tractar-se d'una central d'entrada i sortida energètiques en forma de corrent elèctric, és fonamental dimensionar adequadament les instal·lacions elèctriques que s'hauran d'allotjar a la torre i a les seves proximitats, que serviran per transportar i transformar l'electricitat, a més de donar energia a tots els motors auxiliars.

Els principals elements i maquinària elèctrica presents en una central de les característiques descrites seran:

- Motors-generadors: motors elèctrics de corrent alterna, que disposen d'un estator i un rotor la velocitat de rotació del qual genera energia elèctrica per mitjà de l'acció de

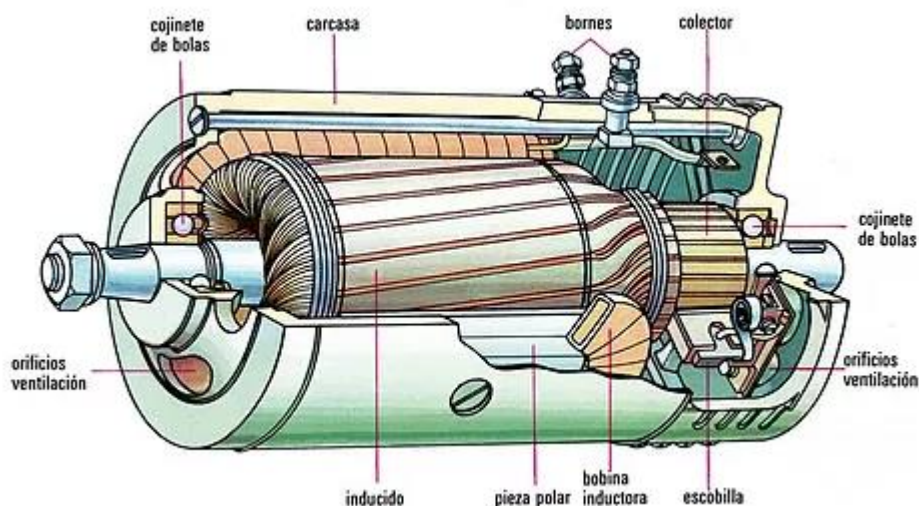
camp magnètic, o bé crea un parell motor a través de la corrent que circula per l'estator quan actua com a motor. Seran l'element més important de la central, ja que s'encarregaran de transformar l'energia elèctrica en energia mecànica (i posteriorment potencial) durant les fases de càrrega, i transformaran l'energia potencial emmagatzemada en energia elèctrica durant les fases de descàrrega.

- **Motors auxiliars:** s'encarregaran de moure les parts mòbils de la instal·lació per a possibilitar la continuïtat de les operacions. Consumiran energia de la xarxa en fase de càrrega i pròpia en fase de descàrrega.
- **Variadors de velocitat (o freqüència):** s'encarregaran de regular la freqüència elèctrica que rep o ofereix el motor AC per a adaptar la seva velocitat.
- **Condensadors:** s'encarregaran de compensar l'energia reactiva provocada pel funcionament asíncron dels motors.
- **Transformadors:** dispositius elèctrics estàtics que transfereixen energia elèctrica d'un circuit a un altre, transformant la tensió U_1 i la corrent I_1 d'un circuit anomenat primari en la tensió U_2 i la corrent I_2 d'un circuit anomenat secundari. Serviran principalment per a fer la transició elèctrica que correspongui entre la central i la xarxa (en el cas d'aquest projecte, podent actuar com a transformadors MT/AT)
- **Comptadors:** són un element elèctric estàtic encarregat de fer el comptatge de la potència d'entrada o sortida de la central.
- **Cablejat:** element físic per al transport d'energia elèctrica, hauran d'estar correctament dimensionats en secció i protegits adequadament contra els elements atmosfèrics, ja que en bona part de la instal·lació circularan per exteriors.
- **Sistemes de control i protecció:** conjunt de dispositius i programes de control que regularan en tot moment les operacions de cada motor i protegiran la instal·lació contra elements adversos, tals com malfuncions, curtcircuits, pertorbacions elèctriques, etc.

5.4.1.1. Motors/generadors i motors auxiliars

Un motor és una màquina motriu, és a dir, un aparell que converteix una determinada forma d'energia en energia mecànica de rotació o parell. Si el motor és elèctric, converteix l'energia

elèctrica en forces de gir mitjançant l'acció mútua dels camps magnètics induïts. Un generador elèctric, d'altra banda, transforma energia mecànica de rotació en energia elèctrica, utilitzant el mateix principi de funcionament del motor, però a la inversa.



Principals parts d'un motor-generador elèctric. Font: montes.upm.es

Independentment del tipus de motor trifàsic, tots converteixen energia elèctrica en energia mecànica mitjançant l'acció mútua dels camps magnètics i contenen 2 elements essencials:

- **Estator:** és un anell cilíndric construït de xapa magnètica (habitualment ferro al silici) i va ajustat a la carcassa que l'envolta. En les parts més interiors de l'estator s'hi troben unes ranures que allotgen les bobines inductores de coure que hi circulen.
- **Rotor:** és la part mòbil del motor. Està constituït per un eix central que està recobert de xapa magnètica amb ranures, on s'hi allotgen les seves pròpies bobines, que van soldades a les peces terminals de metall.
- **Carcassa:** protegeix i encapsula l'estator i serveix de suport per al rotor. Normalment compta amb sistemes per garantir una correcta ventilació de les parts interiors del motor, tals com aletes, ranures i un ventilador acoblat a l'eix del rotor.

Segons el teorema de Ferraris [24], quan per les bobines trifàsiques de l'estator hi circula una corrent trifàsica equilibrada desfasada 120° en el temps, s'indueix un camp magnètic giratori que afecta al rotor. Aquest camp magnètic variable induirà una tensió elèctrica al rotor segons la Llei de la inducció de Faraday. Això donarà lloc a l'efecte Laplace (o efecte motor), que determina que tot conductor per el que circula una corrent elèctrica i que està immers en un

camp magnètic experimenta una força que tendeix a posar-lo en moviment. Anàlogament, es produirà l'efecte Faraday (o efecte generador), que determina que en tot conductor que es mou en un camp magnètic s'indueix una tensió.

Degut a les elevades condicions elèctriques a les que s'haurà d'operar i tenint en compte el gran temps de vida que se li atribueix a la instal·lació, tots els motors elèctrics hauran de ser de corrent alterna. Es preveu que els motors-generadors seran de tipus asíncron o d'inducció, per tant tindran una velocitat de rotació al rotor diferent a la velocitat del camp magnètic de l'estator. El rotor serà de tipus gàbia d'esquirol, ja que així permetrà arribar a la velocitat de sincronisme a l'arrencada. Les connexions entre fases es faran en estrella.

Per tal d'escollir la millor opció en quant a grups motor-generador, és primordial analitzar prèviament les condicions en les que hauran d'operar, ja que sobredimensionar o infradimensionar-los tindrà un impacte negatiu en el rendiment elèctric, paràmetre crític de cara a la utilitat de la instal·lació. S'estima que els motors elèctrics, generalment, ofereixen el seu millor rendiment quan operen al voltant del 75% de la seva potència nominal [25], i es recomana que si no és possible aconseguir aquest valor, no es baixi del 50% ni s'excedeixi el 100% d'aquesta.

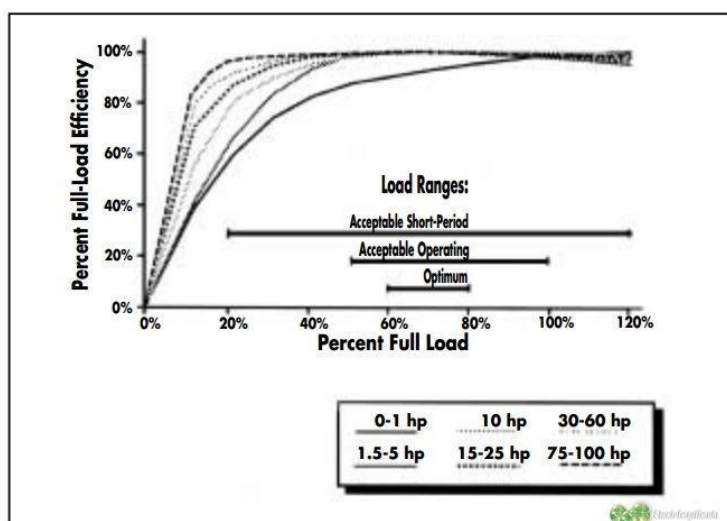


Figura 5.29. Rang de variabilitat del rendiment segons la càrrega i la potència nominal d'un motor elèctric. Font: electricaplicada.com.

Tal com s'ha pogut veure en l'anàlisi energètic de la central, cada motor-generador està encarregat de moure dues càrregues. Per tant, la seva potència elèctrica nominal haurà de ser igual o superior a la potència consumida per dues càrregues en la el règim de màxima operació. Tanmateix, i amb l'objectiu de maximitzar el rendiment de la central, els motors es

dimensionaran per sota del límit màxim de potència, ja que d'altra manera es perdria molta energia quan es treballés en condicions de llargs subministraments.

El rendiment del motor elèctric a instal·lar ve determinat per:

$$\eta_{motor\ elèctric} = \frac{P_{mecànica}}{P_{elèctrica}} = \frac{2 \cdot m \cdot g \cdot v_{operació}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \alpha}$$

Sent U el voltatge d'entrada, I la intensitat i $\cos \alpha$ el factor de potència. És molt important reduir tant com sigui possible el factor de potència, ja que l'energia reactiva no es podrà transformar en treball mecànic útil. Això s'aconseguirà a través de l'ús de condensadors en la xarxa d'alimentació.

Tanmateix, encara que es compensi adequadament l'energia reactiva i s'operi en els règims més favorables per al motor, sempre es perdrà certa energia en forma de calor, que es dissiparà a través de la carcassa de la màquina, que comptarà amb un ventilador connectat a l'eix del rotor per a facilitar l'entrada d'aire i aletes en els seus laterals per a ajudar a la convecció de l'energia tèrmica que es generi.

Per a dimensionar la instal·lació, s'adoptarà un rendiment de conversió electromecànica del 97%. És fonamental que les conversions electromecàniques siguin tant eficients com sigui possible, ja que només d'aquesta manera tindrà sentit l'operació de la instal·lació.

De tota manera, aquest rendiment només serà realista si s'opera entre el 50 i el 100% de la potència nominal del motor. Sabent que la central té capacitat per operar mecànicament en fase de càrrega fins a 1989,3 kW (quan es carrega l'últim pis) i que la potència mecànica que hauria de proporcionar un motor és:

$$P_{màx\ motor} (kW) = \frac{P_{màx\ càrrega}}{2} = 994,7\ kW$$

Els motors haurien de poder assolir aquests valors de potència per a operar. Tanmateix, si es decideix instal·lar un motor de 1 MW aproximadament, quan s'hagi d'operar en fase constant (és a dir, qualsevol valor igual o per sota de $0,83 / 2 = 0,415$ MW), el motor estarà subministrant una potència per sota del seu valor del 50% de la potència nominal. Sabent a més que la instal·lació haurà de poder operar en un ample rang de potències si vol ser prou funcional i no perdre la major part de l'energia en forma de calor o lliscament en el debanat del motor, la potència haurà de ser menor.

A conseqüència d'això, d'altra banda, no es podran assolir els règims de màxima operació dels últims pisos. Tot i això, degut al poc temps que es poden subministrar i el seu augment de potència a mesura que s'elevan els blocs, es considera que tampoc resultaria prou útil

assolir aquestes potències puntualment, ja que es vol aconseguir una captació energètica constant i sostinguda en el temps.

Tampoc es pot infradimensionar el motor, ja que si el dimensionem per la seva velocitat d'operació constant (és a dir, quan pot fer el cicle complet amb potències iguals o per sota dels 415 kW) no es podran assolir règims més potents que, encara que no es puguin portar a terme durant tota la càrrega, sí que ho faran durant un gran nombre d'operacions.

Sent així, i tenint en compte les potències consumides per la central, s'escull una potència nominal per als motors-generadors de 700 kW. Aquesta elecció resulta la més atractiva, ja que:

- Permet operar amb manteniment de rendiment operatiu acceptable entre les potències de 350 kW i 700 kW.
- Els valors òptims de rendiment s'assoleixen entre el 60% i el 80% de la seva potència nominal (420 a 560 kW), tenint el seu pic en el 75%, és a dir, als 525 kW.
- En casos excepcionals, es pot arribar fins al 20% (140 kW) o fins al 120% (840 MW).

Tanmateix, com s'ha mencionat anteriorment, les potències que excedeixin el 100% de la potència nominal de la màquina es consideren no desitjables. Per tant, es limita la potència màxima de la central en fase de càrrega a $700 \times 2 = \mathbf{1400 \text{ kW elèctrics}}$, que equivalen a **1358 kW mecànics**.

Quan el grup motor-generador treballi com a generador, la potència nominal mecànica serà aproximadament la mateixa que en fase de motor. El seu rendiment s'expressarà com a:

$$\eta_{\text{generador}} = \frac{P_{\text{elèctrica}}}{P_{\text{mecànica}}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \alpha}{2 \cdot m \cdot g \cdot v_{\text{operació}}}$$

Sent U la tensió en borns de la màquina. S'agafarà el mateix rendiment que en el cas de la conversió electromecànica, és a dir, del 97%, ja que es preveu donar subministrament constant per valors anàlegs als de la càrrega. Tanmateix, s'hauran de tenir en compte les pèrdues de cara a l'energia final que es proporcionarà a la xarxa. Funcionant com a generador, i tenint en compte el rendiment electromecànic, la potència oferta en funcionament nominal és de **1358 kVA elèctrics**.

Per a limitar la intensitat elèctrica que circularà pel cablejat propi de la instal·lació, es considera el voltatge estàndard de les línies trifàsiques (400 V) com insuficient, pel que el circuit

d'alimentació elèctrica del grup motor generador es farà en la tensió nominal de 690 V, acceptada per un gran nombre de fabricants [26]. Treballant en valors nominals, la intensitat que circularà en borns de la màquina serà de:

$$P_{elèctrica} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \alpha = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

$$P_{elèctrica} = P_{mecànica} \cdot \eta_{generador}$$

$$I = \frac{P_{mecànica} \cdot \eta_{generador}}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{700.000 \text{ VA} \cdot 0,97}{\sqrt{3} \cdot 690 \text{ V}} = 568,15 \text{ A}$$

En el cas dels motors auxiliars, el motor de rotació escollit serà el propi de les grues Liebherr, ja que tenia la capacitat de complir amb tots els règims d'operació de la torre.

Resumint, tal com s'ha dissenyat la instal·lació, es disposa principalment de:

- 3 grups motor-generador asíncrons de gàbia d'esquirol de 700 kW
- 6 motors de desplaçament horitzontal de 25 kW (1 per cada capçal)
- 3 motors triples de rotació de 3 x 11 kW (1 per cada parell de braços)

Per al seu correcte funcionament elèctric, requeriran cadascun un sistema propi de regulació, i hauran d'estar coordinats per un sistema de control dissenyat específicament per a controlar el moviment de totes les parts mòbils de la central.

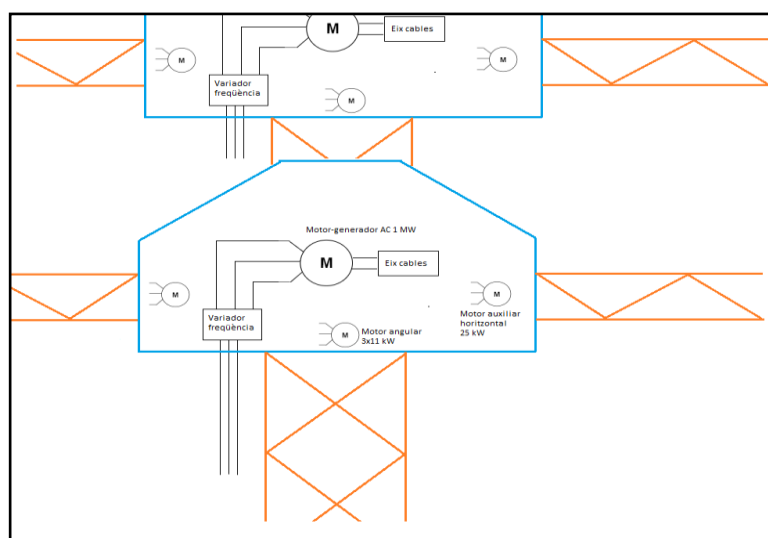


Figura 5.30. Diferents motors allotjats en cada unitat central de les grues, que s'encarregaran de proporcionar l'energia necessària per a operar la instal·lació. Font: propi.

5.4.1.2. Sistema de frens

Tots els motors, sobretot els auxiliars, hauran d'incorporar sistemes de frenada, ja que a través de la regulació de la velocitat de la càrrega en les seves translacions i l'ajustament de la seva acceleració i desacceleració s'aconseguirà uniformitzar la potència captada o cedida i mantenir l'harmonia entre les diferents operacions, alhora de reduir el temps de frenada dels blocs en els seus desplaçaments horitzontals.

5.4.1.3. Regulació de la càrrega: Variadors de velocitat/freqüència

La velocitat de sincronisme en una màquina de AC depèn del número de pols i de la freqüència de la xarxa de subministrament. Aquesta relació es descriu com:

$$n_{sinc} = \frac{60f_e}{p}$$

On f_e és la freqüència, en Hz, i p és el número de parells de pols de la màquina. Aquesta velocitat de sincronisme, en una màquina asíncrona és lleument superior a la velocitat del rotor, d'aquesta manera es genera una tensió induïda en el debat rotòric. Si es supera aquesta velocitat, el motor es començarà a comportar com un generador.

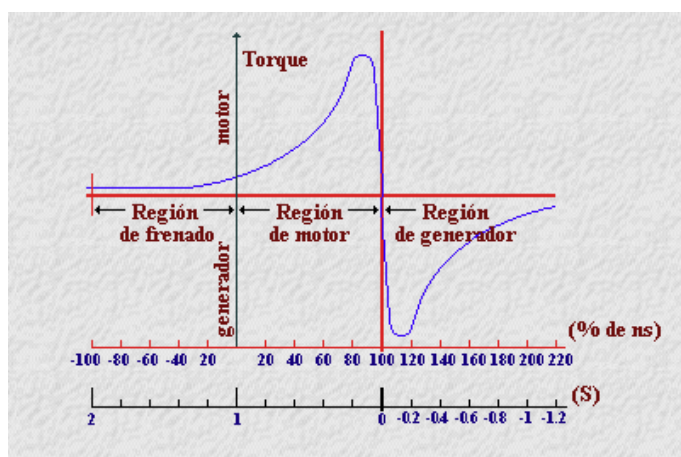


Figura 5.31. Corba par-velocitat d'un motor elèctric estàndard. Font:patricioconcha.ubb.cl.

En la figura 5.31 es poden observar les diferents regions de funcionament d'un motor, així com la regió de generació quan la seva velocitat de sincronisme excedeix la nominal.

La velocitat de sincronisme d'un motor estableix el seu règim de parell-velocitat. Només hi ha dues maneres de canviar la velocitat n_{sinc} , o bé regular-la a través del número de pols o a

través de la freqüència d'alimentació.

Un variador és un dispositiu electrònic que s'encarrega de regular la freqüència elèctrica per alimentar una càrrega, en el nostre cas un motor. Està compost per 3 parts [27] principalment: un rectificador que s'encarrega de transformar el corrent AC en DC, un filtre CD (basat en un condensador) i un inversor que permet convertir la corrent DC a AC i estableix la freqüència de sortida, és a dir d'alimentació del motor.

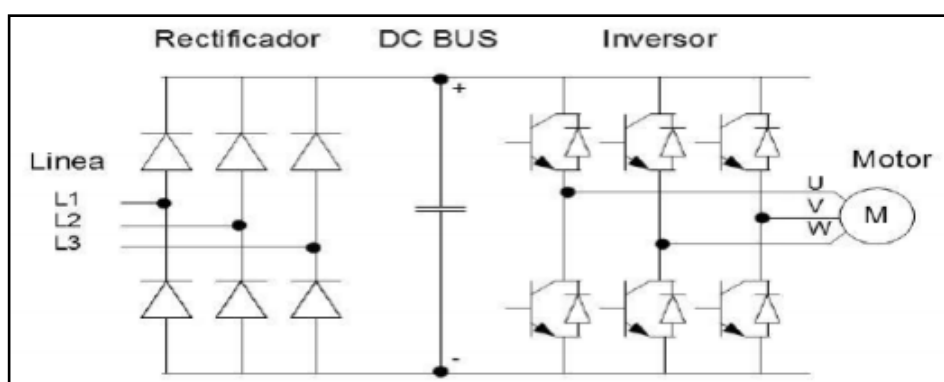


Figura xx. Esquema elèctric del control d'un motor AC a través d'un variador de freqüència. Font: electronicboard.es

Depenent de la potència elèctrica a la que s'està alimentant el motor, el variador de freqüència modularà la seva resposta a través de la modificació de la velocitat de sincronisme.

Tanmateix, com que el motor serà utilitzat també com a generador, s'haurà d'instal·lar l'electrònica de potència necessària per a poder utilitzar el variador de freqüència en doble sentit, i així adaptar l'electricitat generada a la freqüència de xarxa per qualsevol velocitat d'operació.

5.4.1.4. Altres elements elèctrics

Condensadors

Són dispositius elèctrics passius que són capaços d'emmagatzemar energia sustentant un camp elèctric. Estan formats per un parell de superfícies conductores, generalment en forma de làmines o plaques, en situació d'influència total (és a dir, que totes les línies del camp elèctric d'una superfície van a parar a l'altre) separades per un material dielèctric o en buit.

A través del seu ús adequat es podrà modular la quantitat de component reactiva que es

produirà en els motors (ja que els motors asíncrons, degut al seu desfasament inherent respecte la velocitat de sincronisme, generaran conjuntament amb la potència útil).

Transformadors

Es denomina transformador a l'element elèctric que permet augmentar o disminuir la tensió en un circuit elèctric de corrent AC mantenint-ne la potència. Idealment és una màquina sense pèrdues, encara que a la realitat es perd part del corrent que hi circula. Es computa la pèrdua en aquest element en el rendiment de conversió electromecànica.

Aquests elements aniran allotjats al centre de transformació de la central, i allà s'encarregaran d'adaptar la corrent provinent del camp de generació elèctrica a la tensió d'alimentació del motor en fase de càrrega, i d'adequar el voltatge de sortida al de la xarxa quan es funciona com a generador.

Comptadors

Dispositiu elèctric passiu encarregat de comptabilitzar la intensitat, voltatge i potència que circulen per una xarxa elèctrica. Serviran per a enviar les consignes d'entrada al controlador, monitoritzant el comportament elèctric de la xarxa i el camp de generació, i fent actuar la instal·lació d'acord amb la seva lectura.

Quadre elèctric principal

La central haurà de centralitzar en un sol punt les línies d'alimentació dels 3 motors-generadors principals així com les línies d'alimentació dels 9 motors auxiliars. En aquest, s'uniran a la línia d'alimentació principal que prové del centre de transformació. El lloc on s'allotjarà aquesta unió, així com els dispositius de protecció de la instal·lació i els interruptors manuals principals dels motors serà el quadre elèctric principal, situat al peu de la central.

El quadre principal, a més, haurà de comptar amb commutadors automàtics que connectin les línies d'alimentació dels motors secundaris a la línia principal en fase de càrrega o bé a la línia provinent dels generadors en fase de descàrrega.

5.4.1.5. Connexió a la xarxa

La connexió entre la instal·lació, el camp de generació i la xarxa es donarà en el centre de transformació, que allotjarà els commutadors i transformadors necessaris per a adaptar el voltatge de la xarxa al voltatge d'operació dels motors en fase de càrrega, i permetrà adaptar el voltatge de l'energia de sortida en fase de descàrrega, per tal que s'adeqüi als requeriments

de la xarxa.

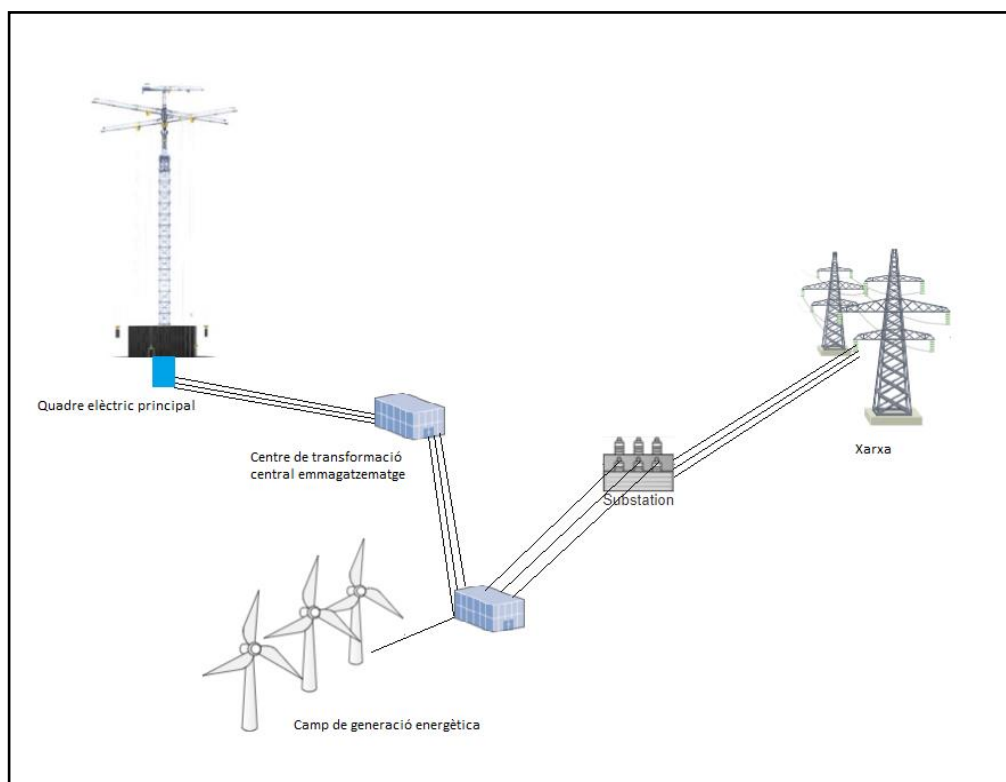


Figura 5.32. Esquema general de la connexió elèctrica de la central amb la xarxa. Font: propi

És important apuntar que en tot el desenvolupament del projecte, així com durant la seva comparació amb altres sistemes, es considera que el propietari del camp de generació d'energia també serà el del sistema d'emmagatzematge, així que no es comptabilitzarà la compra d'energia a tercers, només es valorarà com un sistema d'emmagatzematge d'energia altrament perduda.

5.4.1.6. Controlador

És imprescindible que la central compti amb un sistema de control adequat preparat per a fer-la funcionar de la manera més eficient i fer front a qualsevol tipus de pertorbació, excedent o demanda que tingui la xarxa. El sistema de control ha de coordinar adequadament les velocitats dels motors-generadors, així com de la resta d'elements motrius de la central, per a adaptar-se a les necessitats de la xarxa i donar-hi una resposta estable i precisa.

És molt important que el controlador ajusti les acceleracions i desacceleracions dels motors principals per tal d'uniformitzar tant com sigui possible la potència absorbida o cedida, sobretot en els canvis d'operació entre braços i davant de pertorbacions en la xarxa. El controlador ha de comptar l'entrada/sortida energètica, adaptant les velocitats dels motors a través dels

reguladors de velocitat/freqüència per a donar una resposta adequada als requeriments energètics de la xarxa.

A continuació es proposa una sèrie d'entrades i sortides que el controlador haurà de llegir i gestionar si es vol operar amb el màxim rendiment i seguretat possibles.

Entrades

- Angle relatiu braços
- Distància capçals a eix central
- Altura càrregues en tot moment
- Període de l'operació (en quina fase operativa es troba cada braç)
- Potència oferta o requerida per la xarxa
- Número de bloc transportat per cada capçal i operació

Sortides

- Velocitat, acceleració i frenada motors principals
- Velocitat, acceleració i frenada motors auxiliars
- Nou angle de posició dels braços
- Posició corresponent del bloc transportat

El disseny del controlador de la central és un dels punts més crítics de la instal·lació, ja que serà determinant de cara al rendiment, la seguretat i la velocitat de resposta de la central. El seu disseny podria integrar la totalitat d'un projecte d'enginyeria de control.

6. Valoració energètica

6.1.1. Capacitat d'emmagatzematge de la central i potència absorbida i entregada

La capacitat total d'emmagatzematge de la central és una de les característiques principals que s'ha maximitzat durant la fase de disseny. Al principi del seu recorregut per la central, l'energia elèctrica es transforma en energia mecànica que es consumeix elevant els contenidors al pis superior. Allà hi resta emmagatzemada durant el temps que sigui necessari, no patint cap pèrdua durant el seu emmagatzemament durant el temps (una de les principals avantatges d'aquest tipus de instal·lacions).

Tal com s'ha vist en la taula 5.23 de l'apartat 6.3.3.2, l'energia total emmagatzemada en el pis superior, si es tenen en compte les posicions relatives dels contenidors entre nivells establertes per la correspondència presentada, és de **11.327,33 MJ**, o el que és el mateix, **3146,48 kWh** o **3,146 MWh**.

Tenint en compte el rendiment de la càrrega,

$$\eta_{\text{càrrega}} = \eta_{em} \cdot \eta_{\text{mecànic càrrega}} = 0,97 \cdot 0,9449 = 0,9166$$

S'haurien de consumir **12.357,99 MJ** per a carregar completament el nivell superior. En quant a la descàrrega, es té un rendiment de:

$$\eta_{\text{descàrrega}} = \eta_{\text{mecànic descàrrega}} \cdot \eta_{em} = 0,9411 \cdot 0,97 = 0,9129$$

Pel que es podrien abocar a la xarxa, com a màxim, **10.340,72 MJ**.

Recordem que, tenint en compte les restriccions mecàniques i elèctriques, les màximes potències màximes absorbides i consumides tant en la fase de càrrega com en la descàrrega per cada pis són:

CÀRREGA							
N/pis	Nivell inferior		Nivell superior		Δh (m)	P consumida útil (kW)	P consumida (kW)
	Pis	h (m)	Pis	h (m)			
64	5	5,4	1	25	19,6	785,72	831,54
64	5	5,4	2	27,6	22,2	873,36	924,29
64	5	5,4	3	30,2	24,8	957,79	1013,64
64	4	2,8	4	32,8	30	1117,72	1182,90
64	4	2,8	5	35,4	32,6	1193,52	1263,12
64	4	2,8	6	38	35,2	1266,74	1340,61

64	3	0,2	7	40,6	40,4	1358,00	1400,00
64	3	0,2	8	43,2	43	1358,00	1400,00
64	3	0,2	9	45,8	45,6	1358,00	1400,00
64	2	-2,4	10	48,4	50,8	1358,00	1400,00
64	2	-2,4	11	51	53,4	1358,00	1400,00
64	2	-2,4	12	53,6	56	1358,00	1400,00
64	1	-5	13	56,2	61,2	1358,00	1400,00
64	1	-5	14	58,8	63,8	1358,00	1400,00
64	1	-5	15	61,4	66,4	1358,00	1400,00

DESCÀRREGA							
N/pis	Nivell superior		Nivell inferior		Δh (m)	P generada màxima (kW)	Potència elèctrica útil màxima (kW)
	Núm	h (m)	Núm	h (m)			
64	15	61,4	1	-5	66,4	1400,00	1358,00
64	14	58,8	1	-5	63,8	1400,00	1358,00
64	13	56,2	1	-5	61,2	1400,00	1358,00
64	12	53,6	2	-2,4	56	1400,00	1358,00
64	11	51	2	-2,4	53,4	1400,00	1358,00
64	10	48,4	2	-2,4	50,8	1400,00	1358,00
64	9	45,8	3	0,2	45,6	1400,00	1358,00
64	8	43,2	3	0,2	43	1385,70	1344,12
64	7	40,6	3	0,2	40,4	1322,09	1282,43
64	6	38	4	2,8	35,2	1188,79	1153,12
64	5	35,4	4	2,8	32,6	1118,88	1085,31
64	4	32,8	4	2,8	30	1046,66	1015,26
64	3	30,2	5	5,4	24,8	894,82	867,98
64	2	27,6	5	5,4	22,2	814,94	790,49
64	1	25	5	5,4	19,6	732,23	710,26

Taula 6.1. Potències elèctriques consumides i cedides en règim de màxims. Font: propi.

Per tant, la central podrà treballar de manera completa si absorbeix potències de la xarxa per sota de **0,83 MW** en el cas de la càrrega o bé si està aportant a la xarxa en el cas de la descàrrega una potència elèctrica de **0,71 MW** o menor. En cas que la potència absorbida sigui exactament la límit, la central trigarà **3 h i 47 min** a carregar-se i, si la descàrrega es produeix a 0,71 MW, trigarà **4 h i 26 min** a passar del 100% al 0% de la seva càrrega.

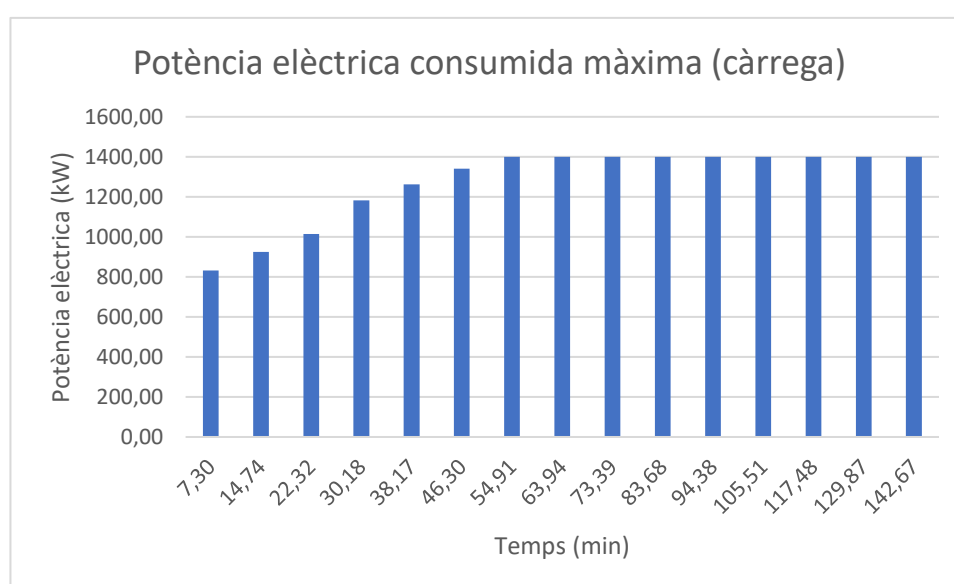
Encara que la capacitat d'emmagatzematge es mantindrà sempre constant, la velocitat de de

càrrega o descàrrega màxima de la central dependrà directament del pis en curs. Per aquest motiu, les potències elèctriques que estiguin entre 0,83 i 1,40 MW per a la càrrega i entre 0,71 i 1,40 MW per a la descàrrega no podran absorbir-se o abocar-se durant tots els pisos, estaran limitats a uns quants en la part més alta del nivell elevat. Si la central comença a treballar de manera parcial, és a dir, partint d'un estat de càrrega diferent a totalment descarregada o carregada, el pis d'on comenci marcarà la potència límit (això és rellevant sobretot de cara a la descàrrega, ja que el pis des d'on s'iniciï marcarà la màxima potència que es podrà entregar inicialment).

El número de pisos en els que es podrà fer la entrega energètica corresponent es veurà limitat pel pis que tingui la velocitat d'operació límit per a la determinada potència i per la potència màxima dels grups motor-generador. Aquí és on entren en joc els règims de funcionament que s'estiguin duent a terme, ja que determinaran el temps que triga a omplir-se o buidar-se el nivell superior i per tant, quedar-se sense més energia a rebre o aportar. S'analitzaran tres situacions principalment: quan la central opera al seu límit operatiu, quan es treballa per sota el límit mecànic en tots els pisos (operació estable en tots els nivells) i quan es treballa entre el límit mecànic i el límit marcat per la potència nominal del motor (límit de rendiment).

6.1.2. Règims de màxima potència absorbida i entregada

Serà el règim de màxim consum o entrega energètica de la central, limitada únicament per les seves restriccions mecàniques, la potència nominal dels motors i la sincronia descrita. Tal com s'ha vist a l'apartat 6.3.4.2, la possible potència màxima absorbida o entregada per la central depenia del nivell en el que es trobés operant, de manera decreixent des dels pisos superiors del nivell elevat fins als seus pisos inferiors, on la potència es reduïa al mínim.



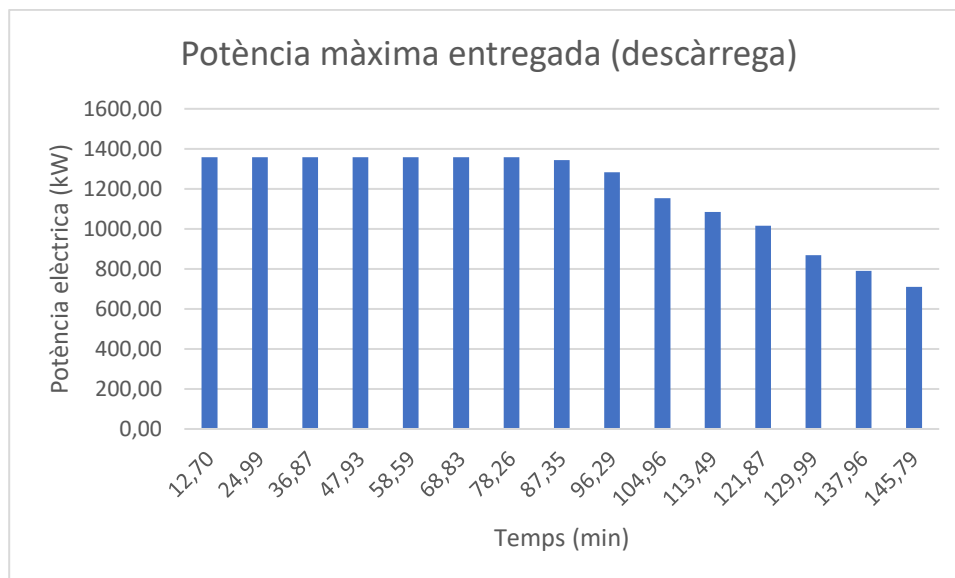


Figura 6.2. Gràfics de la resposta temporal de la central en règim de màxims Font: propi.

Veiem doncs, que si la instal·lació està treballant en règims que requereixen unes condicions superiors a les que pot abastar, la seva resposta màxima serà la presentada per cada pis en operació i durant el temps establert. Si es treballa en aquest règim, la potència que consumirà o aportarà serà esglaonada, de menys a més en fase de càrrega i de més a menys en fase de descàrrega.

Comptant amb que la central opera amb 6 capçals, que estaran recorrent constantment el seu cicle, i que hi ha 64 contenidors a cada pis del nivell superior, el temps total que trigaria la instal·lació a carregar-se en règim de màxima potència seria de 142,67 min, o sigui, **2 h i 23 min**. En cas de descarregar-se a màxima velocitat, es trigarien 145,79 min, o sigui **2 h i 26 min**.

Degut a la gran potència que s'està oferint i la relativa curta durada de les operacions en aquest règim, es podria pensar que és una bona opció operativa si s'està donant una emergència a la xarxa, tal com un tall en el subministrament o una pujada o caiguda sobtada de voltatge per altres possibles motius. En cas que la xarxa tingués una sobrecàrrega que s'hagués de compensar, el sistema operaria com un dissipador (amb l'avantatge de emmagatzemar l'energia, no només desfer-se'n). En cas que la xarxa requerís una entrega d'aquest ordre, el sistema es comportaria com una aplicació tipus volant d'inèrcia, és a dir, com un sistema de suport de ràpida acció.

La central detectaria la pujada o caiguda del voltatge a la xarxa, i començaria a operar

immediatament per a compensar-la. En el cas de preveure una descàrrega, s'ha de tenir en compte que seria molt positiu disposar de contenidors ja en posició de desplaçament vertical per a fer front a aquest tipus de situacions, per no haver de fer ús de bateries pròpies, que encarrarien la instal·lació, i es retardaria la resposta.

6.1.3. Règim d'absorció o entrega constant de potència

Si l'objectiu que es persegueix és el de rebre o d'abocar energia a la xarxa de manera constant, la central només ha d'establir una velocitat de descàrrega constant que es pugui mantenir durant els pisos suficients. Inversament, es poden establir les hores de funcionament desitjades i a partir d'aquí fixar la màxima potència d'entrega.

És important fer notar que en el càlcul de l'entrega de la màxima potència, per a conèixer el temps que es trigava a descarregar tot el nivell superior s'han emprat els temps de cicle complet (incloent els temps morts) per a cada pis. Això és degut a que la velocitat dels capçals no es mantenia constant de pis a pis, ja que s'adaptava al seu temps de cicle mínim, que venia imposat pel temps mort mínim de cada operació. En el cas actual, no es poden agafar com a referència els temps morts, ja que si operem per sota de la potència màxima sempre seran menors que la meitat d'un cicle. Per tant, en aquest règim el que imposarà el temps serà la velocitat d'operació, és a dir, el temps de descàrrega de cada bloc relatiu a la seva alçada.

Per aquest fet, ara es tindrà en compte que en tot moment estan operatius 4 capçals (4 càrregues/descàrregues simultànies), no els 6 cicles de càlcul que s'han pres anteriorment.

Tenint en compte que la potència elèctrica que absorbeix la central és:

$$P_{elèctrica}(W) = \frac{N_{capçals\ operatius} \cdot m_{contenedor} \cdot g \cdot V_{operació}}{\eta_{em}}$$

I que la potència elèctrica cedida per la central és:

$$P_{elèctrica}(W) = \eta_{em} \cdot N_{capçals\ operatius} \cdot m_{contenedor} \cdot g \cdot V_{operació}$$

Si es fixa un valor per a ella, s'estableix una velocitat d'operació determinada, partir de la qual es pot trobar el temps que es trigarà a omplir o buidar la instal·lació completament. Cada pis tindrà associat un temps de desplaçament dels seus blocs, determinat per:

$$t_{total}(s) = \sum_{i=1}^{15} \frac{N_{contenidors\ pis\ i} \cdot t_{desp.ver\ i}}{N_{capçals\ operatius}}$$

En el cas de la càrrega:

$$\begin{aligned}
 t_{desp.ver i} &= \frac{h_{sup i} - h_{infi}}{v_{operació}} = \frac{h_{sup i} - h_{infi}}{\frac{P_{elèctrica} \cdot \eta_{em}}{N_{capçals operatius} \cdot m_{contenedor} \cdot g}} = \\
 &= \frac{N_{capçals operatius} \cdot m_{contenedor} \cdot g \cdot (h_{sup i} - h_{infi})}{P_{elèctrica} \cdot \eta_{em}} \\
 t_{total}(s) &= \sum_{i=1}^{15} \frac{N_{contenedors pis i} \cdot N_{capçals operatius} \cdot m_{contenedor} \cdot g \cdot (h_{sup i} - h_{infi})}{N_{capçals operatius} \cdot P_{elèctrica} \cdot \eta_{em}} = \\
 &= \sum_{i=1}^{15} \frac{N_{contenedors pis i} \cdot m_{contenedor} \cdot g \cdot (h_{sup i} - h_{infi})}{P_{elèctrica} \cdot \eta_{em}} = \\
 &= \sum_{i=1}^{15} \frac{64 \cdot 28.000 \cdot 9,8 \cdot (h_{sup i} - h_{infi})}{P_{elèctrica}(W) \cdot 0,97} = \sum_{i=1}^{15} \frac{18.104.742 \cdot (h_{sup i} - h_{infi})}{P_{elèctrica}(W)} = \\
 &= \frac{18.104.742}{P_{elèctrica}(W)} \cdot \sum_{i=1}^{15} (h_{sup i} - h_{infi})
 \end{aligned}$$

I en el cas de la descàrrega:

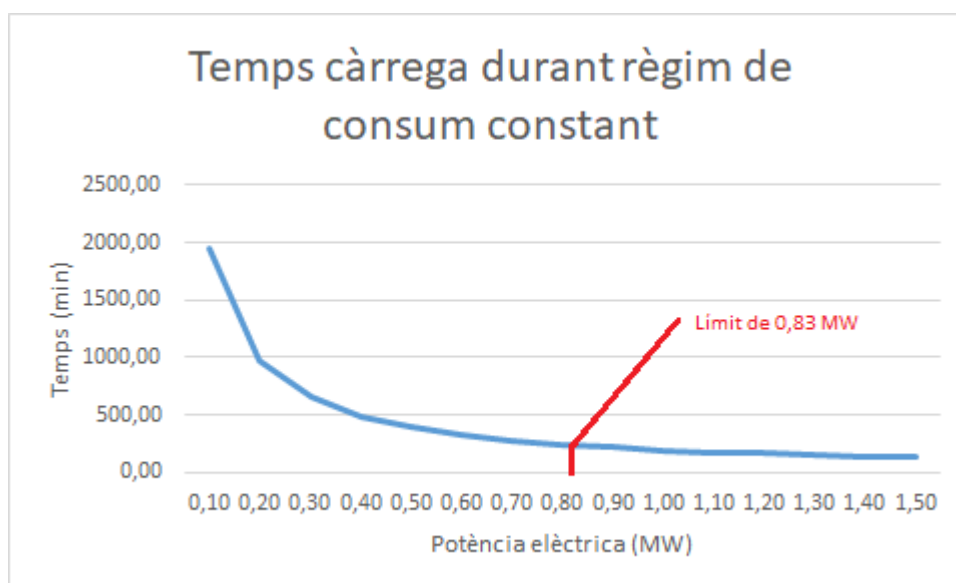
$$\begin{aligned}
 t_{desp.ver i} &= \frac{h_{sup i} - h_{infi}}{v_{operació}} = \frac{h_{sup i} - h_{infi}}{\frac{P_{elèctrica}}{\eta_{em} \cdot N_{capçals operatius} \cdot m_{contenedor} \cdot g}} = \\
 &= \frac{\eta_{em} \cdot N_{capçals operatius} \cdot m_{contenedor} \cdot g \cdot (h_{sup i} - h_{infi})}{P_{elèctrica}} \\
 t_{total}(s) &= \sum_{i=1}^{15} \frac{N_{contenedors pis i} \cdot \eta_{em} \cdot N_{capçals operatius} \cdot m_{contenedor} \cdot g \cdot (h_{sup i} - h_{infi})}{N_{capçals operatius} \cdot P_{elèctrica}} = \\
 &= \sum_{i=1}^{15} \frac{N_{contenedors pis i} \cdot \eta_{em} \cdot m_{contenedor} \cdot g \cdot (h_{sup i} - h_{infi})}{P_{elèctrica}} =
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{i=1}^{15} \frac{64 \cdot 0,97 \cdot 28.000 \cdot 9,8 \cdot (h_{\text{sup } i} - h_{\text{inf } i})}{P_{\text{elèctrica}}(W)} = \sum_{i=1}^{15} \frac{17.034.752 \cdot (h_{\text{sup } i} - h_{\text{inf } i})}{P_{\text{elèctrica}}(W)} = \\
&= \frac{17.034.752}{P_{\text{elèctrica}}(W)} \cdot \sum_{i=1}^{15} (h_{\text{sup } i} - h_{\text{inf } i})
\end{aligned}$$

Degut a la naturalesa no contínua de la resposta de la central, cada pis té una diferència de desplaçament vertical respecte els altres, pel que el seu temps de descàrrega varia. Si es té en compte la suma total de diferències entre pisos, el temps de càrrega i descàrrega en funció de la potència elèctrica es descriu com a:

$$t_{\text{total càrrega}}(s) = \frac{18.104.742}{P_{\text{elèctrica}}(W)} \cdot 648 = \frac{11.731,87}{P_{\text{elèctrica}}(MW)}$$

$$t_{\text{total descàrrega}}(s) = \frac{17.034.752}{P_{\text{elèctrica}}(W)} \cdot 648 = \frac{11.038,52}{P_{\text{elèctrica}}(MW)}$$



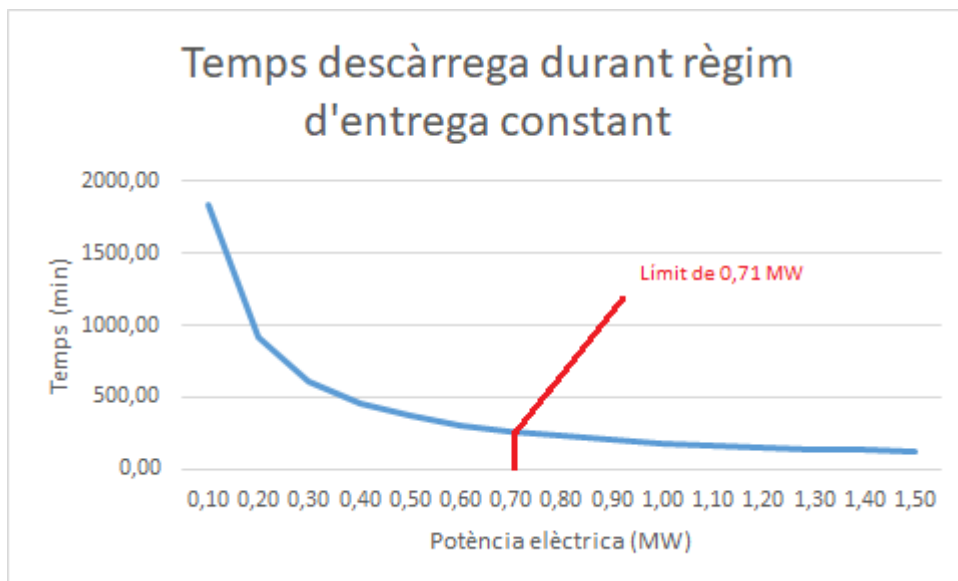


Figura 6.3. Resposta temporal de la instal·lació davant diferents requeriments energètics en la xarxa. Font: propi.

Si no es supera el límit de 0,71 MW (és a dir, el màxim valor de potència que pot oferir la descàrrega de l'últim pis del nivell elevat) o bé el límit de 0,83 MW per a la càrrega, el temps d'operació de la central seguirà la funció descrita. Si s'opera en alguna potència per sobre d'aquests valors, el funcionament només pot ser constant durant les càrregues o descàrregues dels nivells que permetin una potència igual o superior. En els altres pisos, el temps serà el mateix que el de velocitat d'operació màxima i la potència igual a la seva potència màxima.

Contemplant la potència mínima que pot oferir la central, s'estableix que no resultarà eficient treballar amb potències per sota de l'ordre de 300 kW, ja que el consum dels motors auxiliars i la baixada en el rendiment dels motors-generadors provocaran unes pèrdues massa grans.

Tenint en compte aquests factors, el temps de descàrrega total per a diferents potències absorbides o entregades per sota dels límits és de:

Potència elèctrica (MW)	Temps càrrega ct (h)	Temps descàrrega ct (h)
0,30	10,86	10,22
0,40	8,15	7,67

0,50	6,52	6,13
0,60	5,43	5,11
0,70	4,66	4,38
0,80	4,07	3,87 (no ct)

Taula 6.4. Temps total de càrrega i descàrrega treballant amb diferents potències constants. Font: propi.

Veiem doncs, que en cas que la central operi en unes potències elèctriques com les anteriorment descrites, la seva resposta serà contínua i tindrà una durada total com les vistes en la taula xx.

6.1.4. Règim d'absorció o entrega constant parcial de potència

Per a les potències que excedeixin els valors límits mecànics mínims, la resposta no podrà ser contínua durant tota la càrrega o descàrrega. Si es pren per cas que es vol absorbir o entregar 1 MW durant el màxim temps possible, un valor de càrrega que farà operar els motors a valors al 73,2% de la seva potència nominal, obtenint un rendiment pràcticament màxim, s'observa:

CÀRREGA									
Nivell inferior		Nivell superior		Δh (m)	v operació (m/min)	Potència càrrega (kW)	Potència elèctrica (kW)	t càrrega pis (s)	t càrrega acumulat (h)
Pis	h (m)	Pis	h (m)						
5	5,4	1	25	19,6	42,95	785,72	810,02	438,08	0,12
5	5,4	2	27,6	22,2	47,74	873,36	900,37	446,40	0,25
5	5,4	3	30,2	24,8	52,36	957,79	987,42	454,72	0,37
4	2,8	4	32,8	30	53,02	970,00	1000,00	543,14	0,52
4	2,8	5	35,4	32,6	53,02	970,00	1000,00	590,21	0,69
4	2,8	6	38	35,2	53,02	970,00	1000,00	637,29	0,86
3	0,2	7	40,6	40,4	53,02	970,00	1000,00	731,43	1,07
3	0,2	8	43,2	43	53,02	970,00	1000,00	778,50	1,28
3	0,2	9	45,8	45,6	53,02	970,00	1000,00	825,58	1,51
2	-2,4	10	48,4	50,8	53,02	970,00	1000,00	919,72	1,77
2	-2,4	11	51	53,4	53,02	970,00	1000,00	966,79	2,04
2	-2,4	12	53,6	56	53,02	970,00	1000,00	1013,87	2,32
1	-5	13	56,2	61,2	53,02	970,00	1000,00	1108,01	2,63
1	-5	14	58,8	63,8	53,02	970,00	1000,00	1155,08	2,95
1	-5	15	61,4	66,4	53,02	970,00	1000,00	1202,15	3,28

DESCÀRREGA									
Nivell superior		Nivell inferior		Δh (m)	v operació (m/min)	Potència descàrrega (kW)	Potència elèctrica (kW)	t descàrrega pis (s)	t descàrrega acumulat (h)
Núm	h (m)	Núm	h (m)						
15	61,4	1	-5	66,4	56,36	1030,93	1000,00	1131,11	0,31
14	58,8	1	-5	63,8	56,36	1030,93	1000,00	1086,82	0,62
13	56,2	1	-5	61,2	56,36	1030,93	1000,00	1042,53	0,91
12	53,6	2	-2,4	56	56,36	1030,93	1000,00	953,95	1,17
11	51	2	-2,4	53,4	56,36	1030,93	1000,00	909,66	1,42
10	48,4	2	-2,4	50,8	56,36	1030,93	1000,00	865,37	1,66
9	45,8	3	0,2	45,6	56,36	1030,93	1000,00	776,78	1,88
8	43,2	3	0,2	43	56,36	1030,93	1000,00	732,49	2,08
7	40,6	3	0,2	40,4	56,36	1030,93	1000,00	688,20	2,27
6	38	4	2,8	35,2	56,36	1030,93	1000,00	599,62	2,44
5	35,4	4	2,8	32,6	56,36	1030,93	1000,00	555,33	2,59
4	32,8	4	2,8	30	56,36	1030,93	1000,00	511,04	2,74
3	30,2	5	5,4	24,8	48,92	894,82	867,98	486,72	2,87
2	27,6	5	5,4	22,2	44,55	814,94	790,49	478,40	3,01
1	25	5	5,4	19,6	40,03	732,23	710,26	470,08	3,14

Taula 6.5. Temps total de càrrega i descàrrega treballant amb diferents potències constants parcialment. Font: propi.

En les taules xx es pot apreciar, per al cas d'haver d'estar rebent o entregant 1 MW, els pisos que podran complir totalment aquesta demanda energètica i quins no.

En el cas d'estar carregant, es podrà operar absorbint 1 MW un cop s'hagin omplert els 3 primers pisos del nivell superior. En aquests primers nivells, s'absorbiria una potència igual a la màxima per cadascun d'ells (recordem que la potència màxima ve donada per la velocitat d'operació màxima, restringida pel moviment dels braços). Per tant, si es carrega la central de 0 a 100%, els primers 22 minuts (relatius a la càrrega dels pisos P1, P2 i P3) s'absorbiria una potència igual a la seva màxima pròpia marcada per les restriccions mecàniques. Després, durant 2 h i 55 min s'absorbiria la potència objectiu.

En el cas de la descàrrega, començant al 100% de la capacitat, s'entregaria 1 MW durant 2 h i 45 minuts aproximadament, els 24 minuts restants s'oferiria una potència igual a la màxima per P3, P2 i P1.

Tal com funciona la central, és lògic pensar que si s'han de satisfer potències molt definides,

s'operi només en els pisos que sigui possible absorbir o entregar aquesta potència. Per tant, es recomanaria que en el cas de 1 MW, s'operés entre els pisos 4 i 15 del nivell superior, ja que seran els capaços d'absorbir i entregar la potència nominal. Si es funcionés d'aquesta manera, que serà considerada la nominal en l'avaluació de costos, la màxima profunditat de descàrrega de la central seria del 80%.

6.1.5. Rendiment total de la instal·lació i densitat energètica

Rendiment de cicle complet

Per tal de valorar adequadament el rendiment de la central d'emmagatzematge des de l'energia consumida per a elevar els blocs fins a l'entregada a la xarxa en fase de descàrrega, s'hauran de tenir en compte els dos rendiments mecànics operatius així com el rendiment de la conversió electromecànica els 2 cops que es faran transformacions.

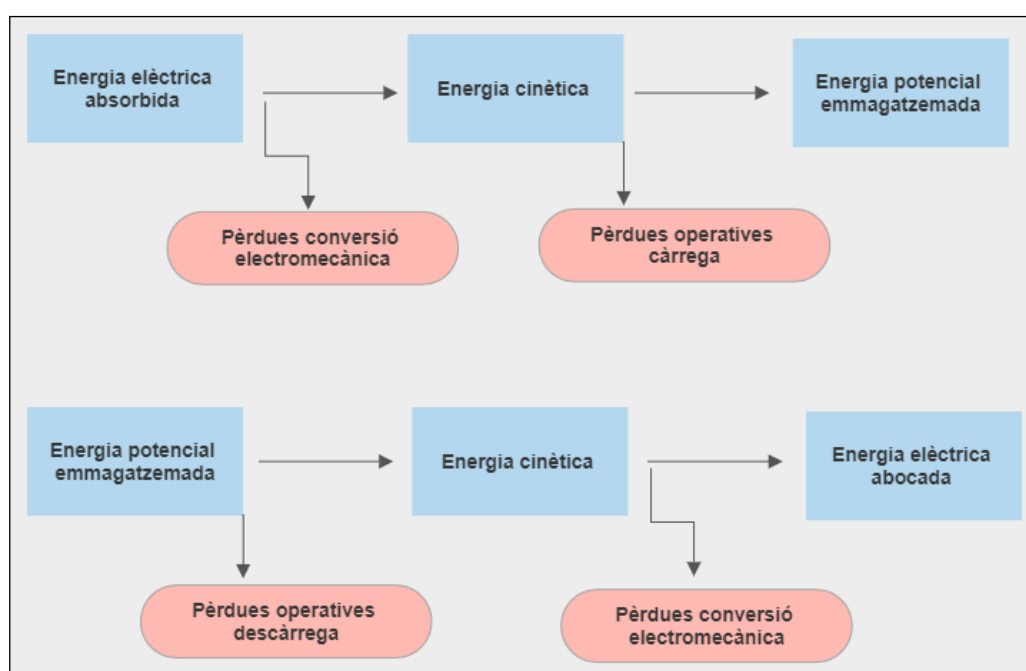


Figura 6.6. Diagrama energètic d'operació amb les pèrdues principals durant la càrrega i la posterior descàrrega.

Font: propi.

Per tant, el rendiment total de la central des que l'energia és absorbida fins que és retornada a la xarxa és de:

$$\eta_{càrrega} = \eta_{em} \cdot \eta_{mecànic\ càrrega} = 0,97 \cdot 0,9449 = 0,9166$$

$$\eta_{descàrrega} = \eta_{mecànic\ descàrrega} \cdot \eta_{em} = 0,9411 \cdot 0,97 = 0,9129$$

$$\eta_{total} = \eta_{càrrega} \cdot \eta_{descàrrega} = 0,9166 \cdot 0,9129 = 0,8367$$

D'aquesta manera, per cada MW absorbit, la central serà capaç de retornar-ne un **83,67%**.

Tot i així, aquest valor de rendiment compta amb que els receptors s'haurien de trobar en les immediacions de la central per a rebre l'energia completa. Donada la mitjana capacitat d'emmagatzematge, tot fa pensar que la central s'hauria de trobar com a molt a uns pocs kilòmetres de les zones que estigui alimentant, ja que sinó gran part de l'energia emmagatzemada es veuria perduda. Es consideraran unes pèrdues per transmissió de com a màxim l'1,5% (valor hàbil per consums a menys de 10 km).

Densitat energètica

La densitat energètica és un paràmetre que representa la quantitat d'energia emmagatzemada en una matèria donada o una regió de l'espai per unitat de volum. És una variable molt útil a l'hora de valorar si un sistema energètic és viable volumètrica o màssicament. Ve donada per l'expressió:

$$\rho_{energètica} = \frac{\text{Energia total emmagatzemada}}{\text{massa total}}$$

En el cas de la instal·lació objecte, sabent que es poden arribar a donar 2872,65 kWh i es té una massa total de 960 contenidors de 28 tones cadascun, la densitat energètica és de **0,107 Wh/kg**.

6.1.6. Temps de vida i cicles d'operació

Segons el que assegurava l'empresa Energy Vault, una instal·lació d'aquestes característiques tindria un temps de vida a priori llarg, sobre els 30-35 anys. Tanmateix, és primordial valorar la intensitat del seu ús per a calcular-lo de manera raonable. Essent conservadors, s'agafen **30 anys** de vida útil, que es prendran també com a temps d'amortització de la instal·lació.

Inicialment, la central estava pensada per servir de sistema d'emmagatzematge per a camps de generació fotovoltaica o eòlica. Prenent per cas que la instal·lació estaria pensada per ser

carregada i descarregada dos cops per dia, amb un funcionament de càrrega matinal, descàrrega al migdia, càrrega a les primeres hores de la tarda i descàrrega a últimes hores de la tarda i durant la nit, i descomptant un 20% de dies de l'any que per diversos motius, tals com vents massa forts, necessitats energètiques satisfetes, requeriments de manteniment, etc. no es pogués o volgués fer servir la central, es farien uns **584 cicles complets per any**.

6.1.7. Comparativa energètica amb altres formes d'emmagatzematge d'energia

Amb l'objectiu de posicionar la tecnologia descrita en el present document en el panorama de l'emmagatzematge energètic actual, es seleccionen altres formes d'emmagatzematge d'energia que compten amb característiques i mètodes de funcionament similars als de l'emmagatzematge en forma de blocs sòlids per a establir una comparació.

Primerament, es selecciona la tecnologia de bombeig hidràulic, ja que seria la seva tecnologia 'germana' dins els emmagatzemadors energètics potencials, i que compta amb els mateixos principis de funcionament. També es selecciona la tecnologia CAES, ja que també és una forma d'emmagatzematge d'energia potencial i s'acostuma a utilitzar en zones aïllades o singulars, ubicacions a priori interessants per les característiques del sistema d'emmagatzematge descrit en el document. Finalment, es seleccionen les tecnologies dels volants d'inèrcia i les bateries de ió-liti, uns perquè donen un servei equiparable a la central treballant en baixa potència i les bateries perquè són actualment el sistema d'emmagatzematge descentralitzat més utilitzat actualment.

Basant-se en els paràmetres estàndard respecte aquestes tecnologies [28], s'elabora la taula xx:

TECNOLOGIES	POTENCIAL SÒLIDA (GRUES)	HIDRÀULICA DE BOMBEIG	VOLANTS D'INÈRCIA	AIRE COMPRIMIT	ELECTROQUÍMIQUES (IÓ LITI)
POTÈNCIA	0,2-2 MW	100-4000 MW	0,002-20 MW	100-300 MW	0,5-50 MW
DURADA DESCÀRREGA	2-10 h	1-24 h	15 min	1-24 h	fins a 6 h
TEMPS DE RESPOSTA	s-min	s-min	s	5-15 min	variable
DENSITAT ENERGÈTICA	0,107 Wh/kg	0,03-1,3 Wh/l	5-130 Wh/kg	30-60 Wh/kg	250 Wh/kg
AUTODESCÀRREGA	0%	< 0,1%/dia	20-100%/dia	< 0,1%/dia	0,2%/dia
TEMPERATURA OPERATIVA	-20 a 50°C	> 0º	-20 a 40°C	sense límits	> 0º

<i>RENDIMENT DE CICLE</i>	aprox 80%	aprox 75%	85-95%	40%	aprox 90%
<i>VIDA MITJANA</i>	30-35 anys	50-100 anys	>20 anys	25-40 anys	5 anys
<i>NÚMERO DE CICLES ESTIMATS</i>	$1,75 \cdot 10^{(4)}$	$2,5 \cdot 10^{(4)}$	$1 \cdot 10^{(7)}$	$1 \cdot 10^{(4)}$	$1 \cdot 10^{(4)}$

Taula 6.7. Comparació dels principals indicadors energètics amb els d'altres tecnologies del mateix camp. Font: El almacenamiento de la electricidad, Juan Ramón Duarte.

Es pot veure, doncs, que les principals avantatges d'aquesta tecnologia són el curt temps de resposta, la nul·la autodescàrrega, les grans possibilitats ambientals (operacions en zones molt fredes o molt càlides), el bon rendiment del que gaudeix i una esperança de vida mitjana llarga. En quant al número de cicles estimats, es trobaria en la part alta de la taula però lluny de la ciclabilitat dels volants d'inèrcia.

Per altra banda, no destaca com una tecnologia amb una potència pic gaire elevada, ni té una durada de descàrrega molt gran en règims operatius habituals (seria de l'ordre de les bateries de ió liti), i té una densitat energètica assimilable a la hidràulica de bombeig, paràmetre que indica que es requereixen grans dimensions per a emmagatzemar l'energia.

També es valora el fet que es una tecnologia escalable, ja que es poden arribar a instal·lar diverses centrals una al costat de l'altre per a arribar a majors capacitats. Si s'instal·lessin un total de 4 centrals al costat del camp de generació, es podrien arribar a oferir potències de l'ordre de 8 MW i temps d'operació propers a les 12 h.

Cal apuntar que els valors de totes les tecnologies depenen de la potència instal·lada en cada sistema en concret, i que en la taula recullen des de petites instal·lacions fins a centrals de grans dimensions. Per altra banda, és possible seguir desenvolupant la tecnologia d'emmagatzematge en blocs sòlids fins a aconseguir majors potències i capacitats d'emmagatzematge. En tractar-se d'una tecnologia més extensiva que intensiva, fer créixer la central en dimensions comportaria un benefici exponencial. A través del disseny de noves instal·lacions, que comptin amb una major altura de separació entre nivells (amb sistemes d'elevació especialitzats en aquesta tasca), nivells més extensos en superfície o que s'utilitzin masses més pesants, la potència proporcionada podria arribar, com en el cas explicat de Gravitricity [8], a potències de l'ordre de 500 MW.

7. Valoració econòmica

Usualment, la major barrera per a la inclusió d'un sistema d'emmagatzematge d'energia està relacionada amb aspectes econòmics. Només serà interessant gestionar una reserva d'energia, amb les complicacions que comporta, quan aquesta sigui econòmicament més rentable que el fet d'instal·lar més potència a través de més generació.

Tal i com succeeix amb moltes tecnologies d'emmagatzematge d'energia, el cost de capital, operació i manteniment pot variar. Aquest cost pot estar influenciat per diversos factors, com són el cost financer del capital, tant si es considera en termes de capacitat d'energia (€/kWh) com en termes de potència (€/kW), l'eficiència energètica, la ciclabilitat o vida mitja del sistema i el cost d'operació i manteniment, entre d'altres, sense oblidar-nos dels costos financers en el plaç d'amortització considerat.

Per a valorar la rendibilitat de la tecnologia, es valoraran els costos associats a la seva construcció i operació amb els beneficis previstos durant els anys.

El cost d'un sistema d'emmagatzematge energètic ve determinat per [29]:

$$C_{total} = C_{inv} + C_{op-man} + C_E$$

Sent:

- C_{total} el cost total
- C_{inv} el cost financer de la inversió
- C_{op-man} el cost d'operació i manteniment
- C_E el cost de compra de l'energia en cas que s'estigui adquirint de tercers

Per a fer l'estudi econòmic, s'adoptarà la hipòtesi que és el propietari de la font de generació qui farà la inversió en la tecnologia d'emmagatzematge, per tant l'energia captada serà excedent pròpia, pel que no tindrà un cost associat.

7.1.1. Cost d'inversió: Disseny i construcció de la central

El cost financer de la inversió depèn de la capacitat d'energia E (en kWh) i de la potència màxima P (en kW):

$$C_{inv} = (C_e \cdot E + C_p \cdot P) \cdot (1 + i)^n$$

Tenint en compte els rendiments de la central, la capacitat energètica E és de **2630 kWh**, i la potència màxima de subministrament és de **1358 kW**. Tanmateix, es desconeixen els costos específics per unitat d'energia (C_e) i per unitat de potència (C_p), així que es calcularan a través de l'any d'amortització de la instal·lació, que a priori s'equivaldrà al temps de vida útil de la instal·lació.

$$C_{inv}(\text{€}) = \text{costos de disseny i construcció (pressupost)}$$

La central objecte del projecte tindrà uns costos de construcció determinats pels materials i elements que componen la instal·lació, pels treballs que s'hagin de portar a terme d'adaptació de l'entorn i per a fer la connexió elèctrica amb el camp de generació i la xarxa.

De manera general, si es volgués construir una central d'emmagatzematge de les característiques descrites, les seves fases d'obra es podrien estructurar en:

- Projecte de disseny de la central
- Estudi geotècnic
- Excavació del nivell inferior
- Fonamentació i construcció de l'estructura de suport de formigó del nivell superior
- Instal·lació de l'estructura central de grues, conjuntament amb tots els elements que la componen (braços, cables tensors, capçals, instal·lacions elèctriques, de control, de protecció)
- Ompliment dels contenidors que serviran d'element emmagatzemador
- Connexió a la xarxa de la instal·lació
- Posada en marxa

Cadascuna d'aquestes etapes tindrà uns costos humans, materials i d'execució propis, que s'analitzaran en detall en el pressupost estimat per a la central.

7.1.2. Pressupost i inversió inicial requerida

Segons el que s'ha anat descrivint en el present document, s'ha preparat un pressupost del cost que comportaria la construcció real de la instal·lació. Tractant-se d'un disseny

eminentment teòric, alguns dels costos són estimats. La resta de preus s'han aproximat o obtingut a través del banc de preus de CYPE Enginyers [30].

Fase	Descripció	Tipus	Amidaments	Preu (€/u)	Cost (€)
1	Disseny				
	Enginyer estructures	MOD	900 h	30 €/h	27000
	Enginyer elèctric	MOD	500 h	30 €/h	15000
	Enginyer de control	MOD	200 h	30 €/h	6000
	Director de projectes	MOD	80 h	55 €/h	4400
2	Estudi geotècnic				
	Enginyer geotècnic	MOD	130 h	30 €/h	3900
	Sondeigs amb extracció de mostra contínua	MAT	5 u	800 €/u	4000
	Assajos SPT	MAT	20 u	450 €/u	9000
	Assajos de laboratori	MAT	40 u	115 €/u	4600
3	Excavació nivell inferior				
	Mà d'obra directa	MOD	1200 h	23 €/h	27600
	Cap d'obra	MOD	200 h	30 €/h	6000
	Moviment de terres	MAT	18.900 m3	3 €/m3	56700
	Maquinària excavadora	MAT	1200 h	28 €/h	33600
	Acumulació de terres	MAT	18.900 m3	0,5 €/m3	9450
4	Fonamentació i construcció de l'estructura de suport				
	Mà d'obra directa	MOD	8000 h	23 €/h	184000
	Cap d'obra	MOD	400 h	30 €/h	12000
	Fonamentació	MAT	1 u	120000 €/u	120000
	Formigó armat de bona qualitat	MAT	5880 m3	70 €/h	411600
	Formigonadora	MAT	4000 h	40 €/h	160000
5	Instal·lació estructura central				
	Mà d'obra directa	MOD	2200 h	23 €/h	50600
	Cap d'obra	MOD	400 h	30 €/h	12000
	Torre central de 70 m	MAT	1 u	600000 €/u	600000

	Braç de doble capçal (inclou materials auxiliars)	MAT	3 u	175000 €/u	525000
	Motors-generadors	MAT	3 u	75000 €/u	225000
	Instal·lacions elèctriques	MAT	1 u	200000 €/u	200000
	Cablejat de connexió	MAT	2500 m	60 €/m	150000
	Contenidors				
	Mà d'obra directa	MOD	480 h	23 €/h	11040
	Contenedor marítim dry van de 20 peus reciclat	MAT	960 u	1500 €/u	1440000
6	Ompliment de contenidors amb material excavat	MAT	960 u	90 €/u	86400
	Camió remolcador	MAT	480 h	35 €/h	16800
	Comprovació de pes	MAT	960 u	5 €/u	4800
	Connexió a la xarxa				
	Mà d'obra directa	MOD	150 h	23 €/h	3450
7	Adaptació connexió camp de generació	MAT	1 u	30000 €/u	30000
	Adaptació connexió amb xarxa	MAT	1 u	65000 €/u	65000
	Connexionat instal·lació	MAT	1 u	50000 €/u	50000
	Posada en marxa				
8	Posada en marxa	MAT	1 u	30000 €/u	30000
	Verificació funcionament	MAT	12 u	2000 €/u	24000
	Total pressupost execució material (€)				4255950
TOTALS	Total pressupost mà d'obra (€)				362990
	TOTAL PRESSUPOST (€)				4618940

Figura 7.1. Pressupost estimatiu de la instal·lació descrita Font: propi.

Veiem doncs que la central objecte d'aquest projecte tindria un cost total associat de **4.618.940 €**. Si prenem per cas que la central serà instal·lada a l'estat espanyol, s'haurà

d'aplicar l'IVA del 21% per a saber el cost final, que seria de **5.588.920 €**.

7.1.3. Costos d'operació i manteniment

Una de les principals avantatges d'aquesta tecnologia és el baix cost d'operació i manteniment, ja que no es compta amb tecnologia de gaire complexitat fora de les pròpies màquines elèctriques, que ja compten amb un gran temps de maduració i rendiments i temps de vida força elevats.

En quant a l'operació, la central ha de poder funcionar pràcticament sense personal propi que la controli, només que en faci el manteniment preventiu i predictiu rutinàriament. Tanmateix, es preveu que el cost d'aquest es vagi incrementant amb els anys de funcionament, a mesura que les múltiples operacions van fatigant els materials que la componen.

És per aquest motiu que es comptabilitzarà un manteniment igual al 0,5% del valor de la inversió inicial, que s'encariria a un ritme de 1% cada any. Amb això, el cost durant el temps de l'operació i el manteniment seguirà la fórmula:

$$C_{op-man} = k \cdot C_{inv} \cdot \sum_{j=i}^{j=n} (1+b)^n \cdot (1+i)^n$$

On k és la fracció del cost d'inversió en tant per u, i b és l'increment anual estimat en cost d'operació i manteniment.

7.1.4. Beneficis econòmics previstos

Per tal de valorar els beneficis que aportarà la instal·lació, s'hauria de fer una previsió realista de la quantitat d'energia que podrà ser emmagatzemada i no es perdrà a la xarxa per sobrecàrregues energètiques. Això dependrà en gran mesura del camp de generació energètica que estigui produint aquesta energia i el tipus de xarxa a la que s'estigui donant suport. També es comptabilitza que el propietari de la instal·lació serà el mateix que el camp de generació, pel que l'energia emmagatzemada no tindrà un cost de compra associat. Amb tot, el benefici econòmic per capacitat durant tota la vida útil de la central es recolliria com:

$$E_t = E_a \cdot C_{e_{t=0}} \cdot \sum_{j=1}^{j=30} \left(\frac{1+w}{1+i} \right)^n$$

Sent w l'encariment del cost del kWh anual, $C_{e_{t=0}}$ el cost del kWh l'any de la construcció i i la inflació anual. Davant la situació del mercat elèctric dels últims anys, i atenent la pujada en les factures durant les hores de màxim consum [x], es pren l'encariment del preu del kWh com un 5% anual.

El cost del kWh s'estima a través de l'anàlisi dels preus de mercat diaris en data de maig del 2021, a través del portal TarifasGasLuz.com [31].

Preu 12-7 h: 0,122 €/kWh

Preu 8-9 h: 0,158 €/kWh

Preu 10-13 h: 0,242 €/kWh

Preu 14-17 h: 0,146 €/kWh

Preu 18-21 h: 0,258 €/kWh

Preu 22-24: 0,162 €/kWh

Així doncs, i establint un criteri conservador durant les hores de màxim preu, s'estableix que la instal·lació es farà dins el mercat elèctric espanyol i que el preu de venda del kWh durant el primer any serà de 0,2 €/kWh.

Els beneficis que comporti la instal·lació seran iguals a l'estalvi generat per la mateixa. Aquest estalvi s'aplicarà cada any a partir del primer.

Tanmateix, els beneficis que aportaria una instal·lació d'aquestes característiques no es limitarien només al valor del kWh emmagatzemat. També s'haurien d'incloure en els beneficis previstos el fet d'evitar problemes derivats del tall de subministrament de la xarxa en hores vall de generació, que podrien causar grans pèrdues econòmiques a usuaris o empreses que rebessin energia de la xarxa (temps morts d'operació, pèrdues econòmiques per estocs malmesos, etc.). És rellevant apuntar que tots aquests beneficis no seran visibles durant l'anàlisi econòmic.

7.1.5. Estimació temporal de recuperació de la inversió: Flux acumulat, VAN, TIR i Payback

A través de l'ús dels paràmetres presentats en l'anterior apartat, es pot fer una previsió temporal dels guanys i costos que tindrà associada la instal·lació. Davant la dificultat de valorar quin serà el cost del terme de potència durant l'ús de la central, ja que depèn d'un gran número de factors, tals com els perfils d'ús, les variacions en la demanda, etc., s'opta per a restringir l'anàlisi de beneficis econòmics en termes d'energia total emmagatzemada i posteriorment cedida.

El cost de la inversió real, comptabilitzat en el primer any, es defineix com:

$$C_{inv} (\text{€}) = \text{Cost construcció (pressupost)}$$

El cost d'operació i manteniment anuals es comptabilitzen com:

$$C_{op-man_t} \left(\frac{\text{€}}{\text{any}} \right) = 0,005 \cdot C_{inv} \cdot (1 + 0,01)^n \cdot (1 + 0,025)^n$$

Els guanys anuals que comportarà l'ús de la central s'establiran com:

$$\text{Guany}_t \left(\frac{\text{€}}{\text{any}} \right) = E_t = E_a \cdot C_{e_{any_0}} \cdot \left(\frac{1 + 0,05}{1 + 0,025} \right)^n$$

Per tal de calcular els beneficis anuals, s'utilitza el paràmetre de flux de fons, o Cash Flow, calculat com:

$$F_t (\text{€}) = \text{Total guanys any } t - \text{Total pagaments any } t$$

El flux total de fons serà igual a la suma de tots els Cash Flows fins a l'any d'estudi t. A continuació es presenta aquest flux de caixa durant els anys d'amortització de la instal·lació:

Any	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Inversió inicial	4618940								
IVA	969977,4								
Costos op&man	23908,79	24751,57	25624,0659	26527,31	27462,4	28430,45	29432,63	30470,13	31544,2
Guany	314676,3	322351,3	330213,552	338267,5	346518	354969,6	363627,4	372496,4	381581,7
Flux de fons	-5298150	297599,8	304589,486	311740,2	319055,6	326539,2	334194,8	342026,3	350037,5
Flux acumulat	-5298150	-5000550	-4695960,7	-4384220	-4065165	-3738626	-3404431	-3062405	-2712367

	15	16	17	18		28	29	30
	38832,1	40200,93	41618,02	43085,05		60922,68	63070,21	65293,43
	440940,6	451695,3	462712,2	473997,9		603157,5	617868,7	632938,6
	402108,5	411494,3	421094,2	430912,8		542234,8	554798,5	567645,2
	-433328	-21834,1	399260,1	830172,9		5731007	6285806	6853451

Taula 7.2 Flux de fons acumulat durant el temps de vida de la instal·lació. Font: propi.

VAN

Tanmateix, a mida que passen els anys la inflació va fent perdre valor als diners, pel que s'haurà de corregir aquesta disminució a través del VAN. El VAN, o Valor Actualitzat Net, permetrà calcular el valor futur dels flux de caixa total originat per la inversió. L'objectiu del càlcul és comparar el valor del VAN (flux efectiu que genera la inversió equivalent al dia d'avui) amb la inversió inicial. Es calcula segons l'expressió:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t} - I_0$$

Com ja s'ha mencionat, k (tipus d'interès) serà igual al IPC, prenent aquest com 2,5%, i I_0 serà el valor de la inversió inicial. Amb tot, el valor del VAN per a la inversió és de **3.862.200 €**.

TIR

La TIR, o Taxa Interna de Retorn, és un mètode de valoració de la viabilitat d'una inversió que mesura la rendibilitat dels cobraments i pagaments actualitzats. És a dir, avalua la rendibilitat del projecte i, per tant, proporciona la rendibilitat de la inversió efectuada. La TIR és la taxa del moment que iguala el VAN a zero, és a dir, l'any a partir del qual la inversió comença a donar beneficis.

Es calcula directament a partir del flux de fons anual, i té un valor per a la instal·lació objectiu del **6%**.

Payback

El Payback correspon al període de recuperació de la inversió, i es pot obtenir directament a partir dels fluxos de caixa acumulats. En el cas actual, s'arriba a l'instant de Payback **16 anys** després de fer la construcció de la central.

Per tant, a través d'aquests indicadors, veiem que el temps de vida de la instal·lació superarà el temps de recuperació de la inversió, a més de proporcionar uns valors que donen fe de la rendibilitat del projecte, pel que es podria considerar com una tecnologia rentable.

7.1.6. Comparació amb altres alternatives d'emmagatzematge d'energia

A part del propi cost de la inversió, existeixen altres indicadors de caràcter generalista que permeten comparar els costos de les diferents tecnologies d'emmagatzematge, per tal d'ajudar a enginyers i inversors a triar la solució més adequada per cada situació. Per a comparar la rendibilitat de la tecnologia amb la d'altres formes d'emmagatzematge, s'estudiarà el seu cost per unitat d'energia emmagatzemada. El cost de l'energia generada per un sistema d'emmagatzematge es descriu normalment mitjançant el paràmetre LCOE (*Levelized Cost of Energy* (€/kWh)) [32], i s'obté a través de la fórmula:

$$LCOE = \frac{C_{total}}{E_a \cdot \sum_{j=i}^{j=n} \left[\frac{1+w}{1+i} \right]^j \cdot (1+i)^n}$$

Tanmateix, aquesta fórmula s'aplica en cas que s'estigui adquirint l'energia emmagatzemada de tercers. En la hipòtesi del nostre sistema, aquest valor LCOE prendria la forma:

$$LCOE \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) = \frac{C_{inv} + \sum_1^{30} C_{op-man}}{E_{anual} \cdot N_{anys} \cdot (1 + 0,025)^n} = 0,0706 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

Un cop obtingut, es compara aquest indicador amb el de les mencionades tecnologies competidores, així com alguns valors de referència [28] de les inversions inicials que comporta cadascuna:

TECNOLOGIES	POTENCIAL SÒLIDA	HIDRÀULICA DE BOMBEIG	VOLANTS D'INÈRCIA	AIRE COMPRIMIT	ELECTROQUÍMIQUES (IÓ LITI)
INVERSIÓ INICIAL	Aprox 5 M€	450-1000 M€	Aprox 4 M€	Aprox 250 M€	50-200 M€
LCOE (€/kWh)	0,071	0,08	0,077	0,085	0,117

Taula 7.3. Comparació de les inversions inicials i LCOE dels sistemes d'emmagatzematge competitiu. Font: e El almacenamiento de la electricidad, Juan Ramón Duarte.

Es pot apreciar que la inversió inicial en el sistema és molt menor que per d'altres opcions, exceptuant els volants d'inèrcia, que són de l'ordre de la instal·lació objecte. En quant al LCOE, ens trobem dins el mateix rang de valors que per a les altres tecnologies.

És important recordar que els valors presentats per a les tecnologies competidores poden abastar una àmplia gamma d'operacions, degut a les diferents característiques dels sistemes que els componen. D'aquesta forma, la comparació únicament en base de inversió inicial i LCOE pot ser incompleta, ja que s'han de tenir en compte altres característiques, tals com la

capacitat d'energia, la potència, la ciclabilitat, etc., per a avaluar la idoneïtat de la inclusió d'un sistema determinat per una aplicació en particular.

8. Impacte energètic, ambiental i social

8.1. Impacte energètic

A través de l'anàlisi energètic i la comparació dels principals paràmetres energètics de la tecnologia estudiada amb els de les seves principals competidores, s'han pogut obtenir una sèrie de conclusions de cara al seu funcionament comercial i quin tipus de servei podria oferir.

Tal i com succeeix amb totes les tecnologies d'emmagatzematge, la potencial sòlida tindria una sèrie d'aplicacions més favorables que d'altres. Les seves aplicacions potencials són àmplies, i es presenten com una bona solució per a zones aïllades, molt fredes o molt càlides, o bé que no disposin de recursos hídrics d'importància.

S'ha presentat com una tecnologia que podria desenvolupar un paper semblant a les actuals centrals hidroelèctriques de bombeig de cara a la regulació i compensació de la xarxa, encara que a menor escala, almenys pel moment, ja que proporcionaria potències i temps de descàrrega total de l'ordre de 1 a uns pocs MW.

A continuació s'estableix una llista de conclusions que s'han extret un cop finalitzat l'estudi:

- Les capacitats energètiques descrites per Energy Vault estaven sobrevalorades (kWh totals, kW generats), ja que en un principi la central havia de proveir potències de l'ordre de 5-10 MW durant 8-10 h, i hem vist que, sense superar les dimensions de seguretat d'una grua de bones prestacions comercial, i funcionant amb 6 capçals, les potències màximes obtingudes són de l'ordre de 1-2 MW i poden actuar en un rang de 3 a 6 h principalment.
- Té un bon rendiment energètic en la operació completa, superior a l'ofert per la majoria de tecnologies d'emmagatzematge, exceptuant bateries liti i sistemes d'emmagatzematge hidroelèctric de bombeig.
- Presenta uns costos competitius, i es planteja com una solució de ràpida implantació degut al poc temps de construcció que tindria.
- Tecnologia poc intensiva, es necessiten grans volums i pesos per a aconseguir valors més interessants comercialment. Es requereix fer una instal·lació més gran (guanyant sobretot altura) per a que sigui funcional de cara a la xarxa general. Una bona opció seria construir diverses centrals juntes, per tal d'arribar a requeriments de potència més grans i tenir la possibilitat de treballar durant més hores

- Presenta molt poques limitacions, exceptuant zones amb vents intensos. Algunes aplicacions interessants podrien ser:
 - Zones aïllades que no disposin de recursos hídrics
 - Illes
 - Terrenys molt calorosos o molt freds
 - Vessants de muntanyes (s'hauria d'adaptar la solució a un indret d'aquestes característiques geogràfiques)
 - Degut a les seves capacitats energètiques, sembla una solució adequada per a grups petits de molins eòlics (2 o 3 per cada instal·lació) o bé de granges solars de mitjanes dimensions.

8.2. Impacte ambiental

Emissions de gasos contaminants

L'operació de la instal·lació descrita no emet cap tipus de gas contaminant, encara que, tal com marca la tendència actual de valoració mediambiental, qualsevol producte o edificació s'ha d'estudiar en tot el seu cicle, és a dir, des del moment que s'aconsegueix el material per a construir-la fins que es dona per finalitzada la seva vida útil.

Les principals fonts contaminants durant el cicle de vida de la central d'emmagatzematge en forma d'energia potencial es donen durant la seva construcció, ja que implica l'obtenció dels materials, la seva fabricació (grues, motors elèctrics, contenidors), la construcció de l'estructura de formigó (material la creació del qual implica pràcticament l'emissió de tant de CO₂ com de formigó s'ha fabricat, amb una relació aproximada de 900g/kg [33]) així com l'ús de vehicles i maquinària pesant per a fer l'excavació i muntar l'estructura.

Durant les operacions no es produiran emissions, encara que els materials de reparació i els treballs de manteniment requeriran també maquinària, encara que es fa difícil fer una estimació realista de com seran aquestes emissions. Un cop es doni per finalitzada l'operació, o es vulgui desmuntar per a utilitzar l'àrea per altres fins, també es produiran certes emissions i caldrà disposar els residus i rehabilitar l'àrea. Una altra avantatja que té l'ompliment dels

contenidors amb terres locals és que un cop es vulgui re-omplir el buit generat en l'excavació del nivell inferior, només caldrà buidar-los.

Tanmateix, les emissions derivades de la construcció, operació i post-operació de la central seran pràcticament nul·les davant l'impacte ambiental que tindria una central hidroelèctrica reversible, així que caldria valorar la possibilitat de substituir petites hidroelèctriques per sistemes d'emmagatzematge sòlid, si es prioritza la conservació del medi local i de les espècies fluvials.

La central d'emmagatzematge d'energia potencial només produirà emissions de rellevància durant la seva fase prèvia (constructiva) i la seva fase de desmuntatge, concentrant-se aquestes en la primera. És fa una estimació de les emissions en la següent figura [34]:

Fase de construcció	Fase d'operació	Fase de post operació
90%	2-3%	7-8%

Taula 8.1. Distribució de les emissions de la central durant tot el seu cicle de vida. Font: energyvault.com.

Durant l'any 2020, les emissions de CO₂ per MWh en el mix elèctric espanyol es situaven al voltant dels 0,19 tCO₂eq/MWh [35]. Si la central fos instal·lada aquí, es produiria un estalvi total durant el seu temps de vida de:

$$Em_{tCO_{2eq}} = Ea_{total} \cdot 0,19 \frac{tCO_{2eq}}{MWh} = 46.077,7 tCO_{2eq}$$

Si comparem aquest valor d'estalvi amb el que costaria fabricar l'estructura de formigó, que té una massa total de 14.691 tn, i comptant amb el ràtio de generació de diòxid de carboni per kg de formigó fabricat, l'estalvi generat és d'aproximadament **32.856 tn de CO₂**.

Impacte visual

Un impacte de la instal·lació que caldria avaluar en profunditat seria l'impacte visual que tindria, ja que es tracta d'una estructura amb grues de fins a 80 m d'altura i, en fase carregada, formaria pràcticament la silueta d'un edifici de grans dimensions.



Figura 8.2. Aparència de la instal·lació en una zona habitada, Ginebra, Suïssa. Font: energyvault.com.

Per altra banda, una estructura d'aquestes característiques podria suposar un reclam visible de la transició energètica, i es podria utilitzar la seva visibilitat a certa distància com un espai publicitari o característic de l'indret on estigui instal·lada.

Altres

Un altre problema inherent a una estructura d'aquest tipus serà el doble ús dels blocs, que serveixen com a element emmagatzemador però també d'element constructiu, ja que a través del seu apilament s'aconsegueix guanyar alçada en el nivell elevat. Això comporta un risc estructural, i el fet que qualsevol caiguda o fallada en el posicionament d'un bloc pugui ser crític de cara a l'operació, a més del perill que suposa que caigui des d'una gran alçada. És fonamental per a la seguretat de la central i de les persones que estiguin en les seves immediacions que els sistemes de fixació funcionin correctament, i que es tingui en compte en tot moment l'impacte de la força del vent, que si supera un cert llindar pot comprometre el funcionament a més de desestabilitzar les operacions.

Per últim, cal tenir en compte que la construcció de la central d'emmagatzematge, així com qualsevol obra humana, afecta a l'entorn, i els seus efectes negatius són rebuts pel sòl, la fauna i la flora del lloc on s'instal·len. Per exemple, l'erosió que causaria la construcció, o l'excavació que s'hauria de portar a terme per a fer el calaix del nivell inferior s'haurien de reparar en cas que es desmuntés la instal·lació.

Conclusions

Un cop finalitzat el projecte i vistos els resultats, es pot concloure que l'emmagatzematge d'energia potencial resulta viable i rentable, però que és necessari seguir desenvolupant solucions basades en la tecnologia que utilitzin de manera més eficient l'energia i que s'assoleixin majors potències operatives, ja que la magnitud de generació actual encara les manté allunyades del mercat.

El gran repte d'aquest treball ha estat possiblement el re-disseny de la instal·lació proposada per Energy Vault, així com algunes suposicions o aproximacions que s'ha pres amén de simplificar el treball i no allargar-lo més del necessari per a complir l'objectiu que s'havia plantejat: establir un primer document propi en el camp d'aquesta tecnologia, que pugui servir com a referència per a futurs projectes.

A través de l'estudi realitzat, s'ha pogut veure que la capacitat energètica plantejada per Energy Vault estava sobrevalorada, encara que el rendiment de cicle complet i els baixos costos de inversió i operatius fan que pugui ser viable a petita escala. Futurs estudis sobre el tema, amb dissenys que maximitzin el pes transportat i l'altura total de la instal·lació, podrien fer que en els pròxims anys apareguin noves solucions d'emmagatzematge d'energia potencial sòlida en altura o que fins i tot es posin en pràctica en el mercat energètic de molts països.

Tanmateix, si realment volem transicionar cap a una economia totalment descarbonitzada arreu del món, l'emmagatzematge d'energia potencial en forma sòlida haurà de seguir-se desenvolupant, ja que es tracta d'una tecnologia de mínima maduresa i un futur prometedor, i integra molt bé el pensament que ens ha de guiar en la lluita contra el canvi climàtic: exprimir fins a l'última idea possible per tal de reparar, o com a mínim pal·liar, els efectes de la generació energètica tradicional.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] INGRAM E. *Pumped storage development activity snapshots*. Hydro Review, December 2009.
- [2] <http://www.iovenesnucleares.org/blog/articulos/gen-iv/>. [En línia] [*Característiques de les centrals nuclears de 4a generació*]
- [3] <https://es.statista.com/estadisticas/600309/reservas-mundiales-de-litio-por-paises/>. [En línia] [*Ubicació geogràfica reserves mundials de lití*]
- [4] <https://www.iberdrola.com/medio-ambiente/almacenamiento-de-energia-eficiente>. [En línia] [*Classificació de sistemes d'emmagatzematge d'energia*]
- [5] <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-centrales-hidroelectricas-de-bombeo-del-mundo/>. [En línia] [*Les centrals d'hidrobombeig més grans del món*]
- [6] <https://www.diaridetarragona.com/ebre/La-central-reversible-un-proyecto-en-clau-de-futur-per-a-les-Terres-de-IEbre-20210524-0016.html>. [En línia] [*Projecte de la central d'hidrobombeig de Riba Roja*]
- [7] <https://aresnorthamerica.com/>. [En línia] [*Web de l'empresa ARES North America*]
- [8] <https://gravitricity.com/>. [En línia] [*Web de l'empresa Gravitricity*]
- [9] <https://www.gravitypower.net/>. [En línia] [*Web de l'empresa Gravity Power*]
- [10] <https://energyvault.com/>. [En línia] [*Web de l'empresa Energy Vault*]
- [11] <https://www.forbes.com/sites/peterdetwiler/2019/08/14/tower-of-power-110-million-investment-primers-energy-vault-to-take-on-global-energy-storage-markets/>. [En línia] [*Inversions aconseguides per Energy Vault*]
- [12] <https://www.ipaf.org/es/faqs/cual-es-la-maxima-velocidad-del-viento-permitida-para-trabajar-con-una-plataforma-aerea>. [En línia] [*Velocitat màxima del vent per a l'operació de medis d'elevació*]
- [13] EMILIO LARRODE, ANTONIO MIRAVETE. *Grúas*. 1996.

- [14] JUAN PERALES GÓMEZ. *Análisis estructural de una grúa pluma*. Universitat Politècnica de València, 2019-2020.
- [15] <https://www.gruasyequiposgarcia.com/como-funciona-una-grua-de-construccion/>. [En línia] [*Dimensions i càrregues màximes d'una torre grua de característiques comercials*]
- [16] https://www.construmatica.com/construpedia/Ensayo_de_Penetraci%C3%B3n_Est%C3%A1ndar. [En línia] [*Descripció d'un assaig de penetració estàndard SPT*]
- [17] <https://pdf.directindustry.es/pdf/liebherr-cranes/gruas-torre/16233-245833.html> [En línia] [*Catàleg de les torres grua de la marca Liebherr*]
- [18] <https://www.icontainers.com/es/ayuda/contenedor-40-pies/#:~:text=Un%20contenedor%2040%20pies%20vac%C3%ADo,m%C3%A1ximo%20de%2032%2C5%20toneladas>. [En línia] [*Capacitat màxima d'un contenidor marítim*]
- [19] <https://www.archcontainers.com/2017/07/27/contenedores-apilados-correctamente/>. [En línia] [*Número màxim de contenidors emmagatzemats verticalment*]
- [20] <https://www.vialibre-ffe.com/noticias.asp?not=8347>. [En línia] [*Pes propi d'un tren de mercaderies*]
- [21] <https://www.galistar.es/densidad-hormigon/>. [En línia] [*Densitat característica de diferents formigons*]
- [22] <https://www.mitma.gob.es/organos-colegiados/mas-organos-colegiados/comision-permanente-del-hormigon/cph/instrucciones/ehe-08-version-en-castellano>. [En línia] [*Normativa espanyola sobre treballs amb formigó*]
- [23] <https://marcelopardo.com/resistencia-caracteristica-del-hormigon>. [En línia] [*Resistències característiques del formigó segons el seu grau*]
- [24] <https://sites.google.com/site/bjorn512/efectos-y-principios/teorema-de-ferraris>. [En línia] [*Demostració gràfica del teorema de Ferraris*]
- [25] <https://www.interempresas.net/Robotica/Articulos/98865-Determinar-la-carga-de-un-motor-electrico-es-esencial-para-el-rendimiento-energetico.html>. [En línia] [*Determinació de la càrrega de treball d'un motor per a rendiment energètic màxim*]
- [26] <https://www.menzel-motors.com/squirrel-cage-motor/ic411-ic416/>. [En línia] [*Tensions nominals d'alimentació de motors elèctrics*]

[27]

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c2/CONTROL_ESCALAR_MOTOR_DE_INDUCION_TRIFASICO..pdf. [En línia] [*Control escalar d'un motor elèctric a través d'un variador de freqüència*]

[28] JUAN RAMÓN MORATE. *El almacenamiento de la electricidad*. Fundación Gas Natural Fenosa, Energía y Medio Ambiente, 2014.

[29] KALDELLIS J.K., ZAFIRAKIS D. *Optimum Energy storage techniques for the improvement of renewable Energy sources-based electricity generation economic efficiency*. Energy, 2007.

[30] <http://generadorprecios.cype.es/>. [En línia] [*Banc de preus en la construcció any 2020 generat per CYPE Enginyers*]

[31] <https://tarifasgasluz.com/comparador/precio-kwh>. [En línia] [*Tarifas elèctriques mercat elèctric espanyol en data de principis de Juny de 2021*]

[32] DÍAZ-GONZÁLEZ F., SUMPER A., GOMIS-BELLMUNT O., VILLAFÁFILA-ROBLES R. *A review of energy storage technologies for wind power applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2012.

[33] <https://www.ennomotive.com/es/produccion-de-cemento>. [En línia] [*Ràtio de generació de CO2 per tona de formigó*]

[34] OFFI, B., CERUTTI, A., DUERR, M., IANCU, A., KONA, A., JANSSENSMAENHOUT, G. *CoM Default Emission Factors for the Member States of the European Union*. 2017.

[35] <https://www.ree.es/es/sala-de-prensa/actualidad/especial/2020/06/las-emisiones-se-reducen-en-30-millones-de-toneladas-en-5-anos>. [En línia] [*Emissions de CO2 per MWh en el mix elèctric espanyol, 2020*]