



**Treball de Fi de Grau:**

**MODELATGE I SIMULACIÓ**

**DINÀMICA**

**DE LA RETROEXCAVADORA**

**M.315.C**

**Alumne:** Jose Francisco Castillo Muñoz

**Tutor:** Josep Lluís Suñer Martínez

Grau en Enginyeria Mecànica

Any 2017



# ÍNDEX

<b>1. Introducció .....</b>	<b>5</b>
1.1. Justificació	
1.2. Resum	
1.3. Objecte del projecte	
1.4. Objectius	
1.4.1. Objectius generals	
1.4.2. Objectius específics	
1.5. Unitat d'estudi	
1.6. Metodologia i pla de treball	
1.6.1. Metodologia del TFG	
1.6.2. Metodologia tècnica i pla de treball	
1.7. Estructura documental	
<b>2. Generalitats de la maquinària d'obres públiques.....</b>	<b>10</b>
2.1. Introducció	
2.2. Fases operacionals	
2.3. Cicle d'una màquina	
2.4. Canvis de volum	
2.5. Factors generals de producció d'una màquina	
<b>3. Equips d'excavació.....</b>	<b>14</b>
3.1. Introducció	
3.2. Classificació	
3.3. Definició i elements d'una excavadora	
3.3.1. Carro de translació	
3.3.2. Estructura giratòria	
<b>4. Retroexcavadores hidràuliques .....</b>	<b>19</b>
4.1. Definició	
4.2. Utilització	
4.3. Conducció	
4.4. Procediments de treball	
4.4.1. Treballs per sota del sòl de recolzament	
4.4.2. Excavació per damunt del sòl de recolzament	
4.5. Recomanacions generals	

<b>5. Funcionament del sistema hidràulic .....</b>	<b>23</b>
5.1. Sistemes hidràulics	
5.2. Bombes giratòries	
5.2.1. Definició de bomba volumètrica	
5.2.2. Paràmetres que defineixen una bomba volumètrica	
5.3. Vàlvules limitadores de pressió	
5.4. Cilindres dels sistemes hidràulics	
5.5. Tuberies i accessoris	
<b>6. Construcció del model, dibuix i càlculs .....</b>	<b>31</b>
6.1. Obtenció de les dimensions	
6.2. Realització	
6.2.1. Dibuix del model 3D amb “SolidWorks”	
6.2.2. Anàlisi de moviments amb ‘Adams’	
6.2.3. Resolució mètode analític mitjançant la teoria de llaços	
<b>7. Obtenció de resultats i conclusions .....</b>	<b>62</b>
7.1. Obtenció de resultats	
7.2. Conclusions	
<b>8. Plec de condicions.....</b>	<b>88</b>
<b>9. Pressupost.....</b>	<b>90</b>
<b>10. Bibliografia .....</b>	<b>92</b>
<b>11. Agraïments .....</b>	<b>94</b>

# 1. Introducció

## **1. Introducció**

### **1.1. Justificació**

Abans de començar a explicar el treball és necessari justificar l'elecció del tema, ja que això ajudarà a entendre millor l'estudi. Per començar, s'ha de dir que es tracta d'una anàlisi de moviments de la retroexcavadora Caterpillar M315C.

En primer lloc, s'ha escollit aquesta màquina perquè el seu àmbit d'aplicació és molt extens, de manera que es pot utilitzar per realitzar diferents activitats com túnels, carreteres, ferrocarrils, edificis, etc.

En segon lloc i a nivell de l'enginyeria, aquesta màquina presenta un interès complet, ja que compta amb molts elements com són sistemes hidràulics, elèctrics, mecànics, pneumàtics i molts més; fet que provoca que siga una maquinària que està en contínua evolució, tant a nivell de disseny, millora de materials o anàlisi estructural, entre altres.

En definitiva, considerem que la retroexcavadora és una màquina molt completa en tots els aspectes, ja que permet ser utilitzada en molts àmbits i realitzar diferents treballs segons les necessitats del relleu i del projecte.

### **1.2. Resum**

El present Treball de Finalització de Grau (TFG) està basat en l'anàlisi de moviment d'una retroexcavadora d'ús industrial, partint d'un model a escala que simula l'estructura i moviment d'una màquina real, com és la Caterpillar M315C.

Per a realitzar aquest treball, s'hauran de determinar els moviments del model a escala, estimant les distàncies de les barres i els parells de moviments permesos. Una volta obtingudes les distàncies, es podran determinar les equacions de moviment del mecanisme mitjançant l'anàlisi cinemàtica (mètode de llaços), que permetrà analitzar directament el problema de posició. Aquestes equacions s'han de derivar per obtenir les equacions de velocitat i acceleració que defineixen els moviments del conjunt.

Junt amb aquest estudi, el programa 'SolidWorks' serà de vital importància, ja que ens facilitarà la simulació d'un model que s'assembla a la morfologia dels diferents elements que formen el braç d'excavació.

Aquest model l'utilitzarem per donar-li uns moviments estimats amb el programa 'Adams', que ens permetrà analitzar el comportament de les distintes parts que conformen el mecanisme. Utilitzant documents com puga ser llibres o manuals del fabricant, intentarem simular el moviment de tots aquests elements.

Després d'obtenir les equacions i la representació a ordinador, amb 'Adams' es podran determinar les equacions que expliquen el moviment de l'excavadora, realitzant una comparació entre el model matemàtic analitzat amb el mètode de llaços i els resultats que s'obtinga amb 'Adams'.

### **1.3. Objecte del projecte**

El Treball Final de Grau reflecteix la capacitat de l'alumne per a realitzar un treball en el que s'apliquen els coneixements adquirits al llarg de la titulació. En aquest cas, s'intenta demostrar la vàlua per a treballar com a enginyer mecànic, concretament a la especialització de disseny.

### **1.4. Objectius**

#### **1.4.1. Objectius generals**

1. Fer una anàlisi de la retroexcavadora Caterpillar M315C.
2. Complir amb el pla d'estudis de grau en Enginyeria Mecànica, segons el qual és necessari realitzar un treball de fi de grau per a poder obtenir la titulació.

#### **1.4.2. Objectius específics**

1. Obtenir les equacions del moviment del mecanisme mitjançant la teoria de llaços.
2. Dibuixar el model 3D amb el programa de disseny "SolidWorks".
3. Analitzar els moviments del model computacional amb el programa "Adams".
4. Comparar les distintes equacions obtingudes amb els objectius 1 i 3.
5. Exposar les conclusions obtingudes.

## **1.5. Unitat d'estudi**

El treball es centra en la retroexcavadora utilitzada per al moviment de terres Caterpillar M315C, en concret en el moviment dels braços que actuen per a permetre el moviment desitjat de la cullera.

## **1.6. Metodologia i pla de treball**

### **1.6.1. Metodologia del TFG**

Per a dur a terme l'elaboració del present TFG s'ha seguit la normativa per a la realització de TFG i TFM del 7 de març de 2013, 21 de gener de 2015 i 28 de maig de 2015 regulada per la Universitat Politècnica de València i aprovada pel govern.

### **1.6.2. Metodologia tècnica i pla de treball**

La planificació per a realitzar l'estudi sobre la retroexcavadora Caterpillar M315C consisteix en 6 fases:

1. Recerca d'informació sobre la retroexcavadora tant a la xarxa com als llibres que regulen la utilització d'aquest tipus de maquinària.
2. Mesura d'una rèplica a escala 1:16 de l'excavadora, amb l'ajuda d'un peu de rei que proporcionarà unes dimensions aproximades del mecanisme.
3. Construcció del model 3D a ordinador, fent ús de l'eina informàtica "Solidworks".
4. Resolució del problema de posició per al mecanisme dels braços actuadors amb el mètode dels llaços.
5. Obtenir les equacions de velocitat i acceleració del mecanisme amb el mètode analític.
6. Fusionar les dades de les equacions de velocitat i acceleració obtingudes amb el model 3D dissenyat, mitjançant el programa informàtic "Adams".



## **1.7. Estructura documental**

El present treball es pot dividir en 12 documents diferenciats com mostra l'índex, totes aquestes parts formaran la memòria del treball, que intentarà reproduir alguns aspectes de les condicions de treball de la retroexcavadora estudiada.

## 2. Generalitats de la maquinària d'obres públiques

## 2. Generalitats de la maquinària d'obres públiques

### 2.1. Introducció

Cada vegada és més comú la utilització de maquinària pesada per a realitzar tasques de construcció. Per això és important estudiar quines són les característiques tant estructurals com de funcionament per aconseguir el major rendiment de l'equip utilitzat.

Com ja hem avançat, les necessitats actuals obliguen a la utilització de maquinària per al moviment de terres per a molts tipus de treballs, tals com construcció de ferrocarrils, autopistes, preses, canals, cimentació d'obres, etc. El moviment de terres pot constituir l'obra en si, o una tasca auxiliar per a la realització d'un altre tipus d'obra.

'S'entén com moviment de terres el conjunt d'operacions que es realitzen al terreny natural amb la finalitat de modificar la forma per a poder ser aprofitada en l'execució d'obres públiques, industrials o d'edificació' (BARBER, 2003, p. 17).

A més, segons Tiktin (1997), les operacions del moviment de terres en el cas més general són:

- Excavació. Extreure o separar del banc porcions dels seu material.
- Càrrega. Consisteix a col·locar productes d'excavació en un mitjà de transport.
- Descàrrega. Dipositar el material una vegada ha arribat al seu destí.
- Extensió. Formació de capes amb un gruix més o menys uniforme per a la realització d'obres públiques.
- Dissecació. Reducció de la humitat en un terreny per aconseguir una millora en el comportament mecànic.
- Compactació. Afermar enèrgicament el materials.
- Servicis auxiliars. Altres funcions.

L'excavació depèn directament de les característiques del terreny, fet que fa necessari l'estudi previ del material a excavar per poder elegir correctament l'equip a utilitzar.

## 2.2. Fases operacionals

Seguint Barber (2003), les operacions fonamentals que constitueixen l'execució d'un moviment de terres complet són: arrencament o excavació, càrrega, transport, abocament, extensió, compactació i refinament, però no és necessari en tots els casos la utilització d'una màquina per a cada tipus de treball, ja que la majoria d'elles poden realitzar distintes fases.

Existeix una infinitat de maquinària que permet la realització de totes aquestes tasques; es poden agrupar de la següent manera:

- Fase d'excavació. Extracció del material en el moviment de terres realitzat a cel obert i a través de mitjans manuals o mecànics.
- Fase d'excavació i càrrega. Extracció i deposició del material en el moviment de terres.

En aquest treball ens limitarem a estudiar sols l'excavació, ja que és la tasca més usual per al model estudiat. Així, els tipus d'excavació es poden classificar de la següent manera:

- Excavació a l'aire lliure. Es porta a terme a cel obert.
- Excavació subterrània. Extracció del material per sota del nivell de sòl.
- Excavació subaquàtica. Té a veure amb aquella que es realitza per sota de la superfície de l'aigua.

## 2.3. Cicle d'una màquina

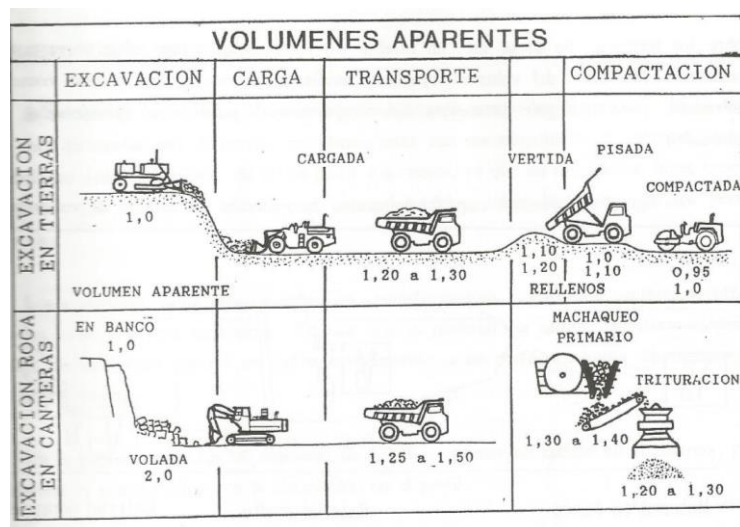
Per conèixer la capacitat real de les màquines que formen un equip, és necessari calcular la duració del cicle de cada màquina.

Es defineix cicle d'una màquina com la sèrie d'operacions necessàries per a realitzar un treball concret fins tornar a la posició inicial. La duració del cicle és el temps que es tarda en realitzar un cicle complet, que es repetirà successivament amb la mateixa duració al llarg de la realització d'un projecte concret.

## 2.4. Canvis de volum

Seguint Tiktin (1997), el volum que ocupa un sòl es denomina volum aparent. Si actuem sobre aquest sòl, l'ordenació de les partícules que el formen varia, canviant així el seu volum aparent. Aquest fet s'ha de tenir en compte per calcular la producció de l'excavació per poder conèixer la dimensió necessària per als mitjans de transport.

Per tant, el volum d'una porció de material no és fixe, sinó que depèn de les accions mecàniques a què el sotmetem. Per a definir el volum aparent hem de tindre en compte que existirà també la densitat aparent, que el relaciona amb la massa de les partícules.



Imatge 1. Representació de l'evolució del volum aparent durant les diferents fases del moviment de terres. Extreta de Tiktin, J. (1997). *Procedimientos generales de construcción. Movimiento de tierras.* (p. 1.4).

## 2.5. Factors generals de producció d'una màquina

- Tipus i classe de l'equip disponible.
- Estat de l'equip.
- Qualitat i condicions dels operadors.
- Qualitat del servei de la maquinària.
- Organització del treball.
- Política de salaris.
- Moral de treball, etc.

### 3. Equips d'excavació

### **3. Equips d'excavació**

#### **3.1. Introducció**

Segons Juan Tikin (1997), la maquinària d'excavació i moviment de terres es pot classificar de la següent manera, depenent de la seua translació:

- Tractors amb fulla empenyedora.
- Tractors amb escarificadors.
- Moto-anivelladores.
- Moto-trailes.
- Carregadores.

Totes aquestes màquines efectuen l'excavació sense desplaçament en excavacions superficials.

Les màquines que efectuen l'excavació són mecanismes que treballen en una posició fixa, però quan l'excavació està fora de l'abast de la màquina, el conjunt es pot desplaçar per a realitzar el treball en una nova posició. Aquest desplaçament s'efectua mitjançant un dispositiu cinemàtic que modifica la posició relativa entre el mecanisme de treball i el cos principal de la màquina.

#### **3.2. Classificació**

Són molts els tipus de maquinària d'excavació, per això és necessari saber quines són les característiques de cadascuna. En aquest treball ens limitarem a estudiar sols la retroexcavadora M315C del fabricant Caterpillar, però donem una classificació general de les màquines que permeten realitzar molts tipus de treball. Així, els equips d'excavació es classifiquen en:

- Excavadores hidràuliques amb pala o martell d'impacte.
- Excavadores de cables.
- Excavadores de roda frontal.
- Excavadores de cangilons.
- Dragues.
- Minadores de túnel.

Com ja hem avançat, aquest treball se centra en l'estudi d'una retroexcavadora hidràulica, així com també de la definició de tots els elements que la componen.

### 3.3. Definició i elements d'una excavadora

Es pot definir *excavadora* com 'màquina autopropulsada sobre rodes o cadenes amb una superestructura capaç de girar 360º, que excava o carrega, eleva, gira i descarrega materials mitjançant l'acció d'una cullera fixada a un conjunt de ploma, balancí o braç, sense que el bastidor o la estructura es desplaça' (BARBER, 2003, p. 58).

Generalment, els equips d'excavació estan composts per tres parts:

- Part inferior o carro de translació.
- Part superior o estructura giratòria.
- Diferents elements que constitueixen l'equip de treball. En aquesta part és on es troben les diferències que distingeixen els diferents tipus de maquinària.

#### 3.3.1. Carro de translació

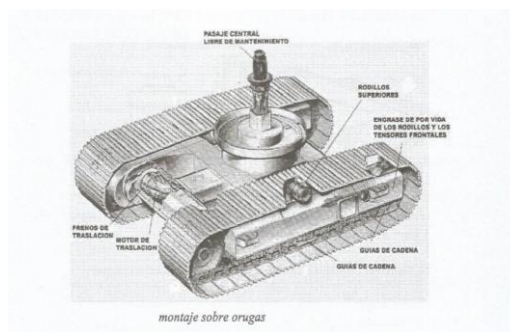
Els carros de translació es poden muntar sobre:

- Erugues.
- Rodes.
- Bastidor de camió.

Per a la maquinària pesada sols s'utilitzen les erugues, ja que són més apropiades per a la càrrega i elevació d'elements pesats. A continuació expliquem cadascun dels muntatges.

#### - Muntatge sobre erugues

En el cas de les excavadores, les erugues no realitzen treballs d'empenta i transport, sols serveixen per a traslladar a xicotetes distàncies una màquina que pot pesar varies desenes de tones. En aquest muntatge s'ha de tenir molt en compte el correcte posicionament de les erugues, ja que el seu disseny no està pensat per a suportar esforços no uniformes.

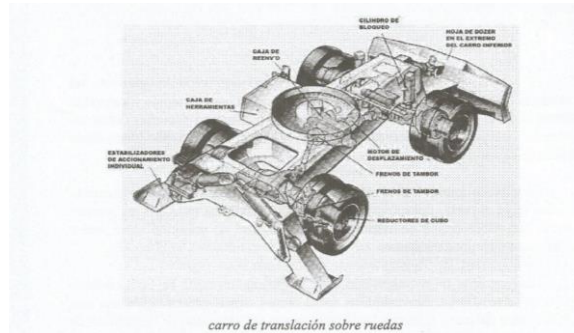


Imatge 2. Màquina de muntatge sobre erugues. Extret de Barber, P. (2003). *Maquinaria de obras públicas II: máquinas y equipos* (p. 60).



## - Muntatge sobre rodes

Aquesta disposició dels elements implica que el centre de gravetat està més alt, per això les excavadores muntades sobre rodes s'utilitzen principalment per treballs de poca importància i quan és necessària una gran mobilitat. Degut a la posició més elevada del centre de gravetat, el bastidor portant conté estabilitzadors en forma de suports articulats per millorar l'estabilitat. Aquests estabilitzadors poden ser mecànics, pneumàtics i hidràulics.



Imatge 3. Màquina de muntatge sobre rodes. Extret de Barber, P. (2003). *Maquinaria de obras públicas II: máquinas y equipos* (p.60).

### 3.3.2. Estructura giratòria

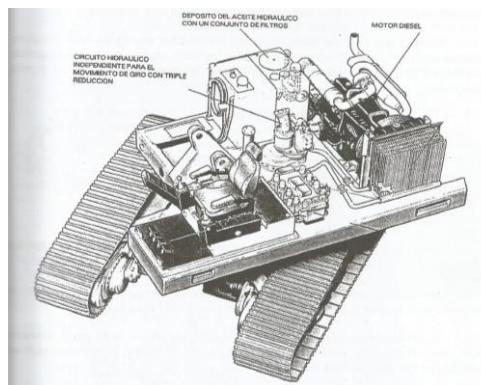
Junt al bastidor hi ha una corona dentada amb orientació fixa que suporta el pes de l'estructura giratòria mitjançant uns cilindres que encaixen amb ella. Aquesta corona gira solidàriament amb el carro inferior. A més, un eix central evita que la plataforma es desplaça o descentre.

És de vital importància que aquests elements siguin disposats de tal forma que l'estructura es mantinga en equilibri, a més, s'ha de permetre una bona visibilitat i accessibilitat per a possibles treballs de manteniment posterior.

Els elements que componen aquesta estructura són:

- Transmissió: majoritàriament s'utilitza la transmissió hidrostàtica, ja que s'obté una major flexibilitat per a maniobrar.
- Motor: la ubicació més comuna per a instal·lar el motor és a la part oposada de la ploma, ja que d'aquesta manera els dos elements es contrapesen.
- Articulació de la ploma: es tracta de dos suports disposats en la part davantera de la màquina, de tal forma que el gir vertical estiga permès però l'horitzontal quede restringit. Aquestes articulacions han de ser robustes, ja que estan sotmeses a esforços de compressió i a grans tensions laterals, degudes a la inèrcia o a les acceleracions produïdes pel moviment del conjunt.

- Mecanisme de gir: quasi totes les excavadores permeten un gir de 360º de la superestructura, però hi ha alguns equips més xicotets que sols permeten un gir de 180º o 270º, característica que les fa més assequibles.
- Contrapès i equilibri: el posicionament més comú per a aquests elements és per baix de la superestructura i el més allunyat possible del centre de gir, fet que augmenta el par estabilitzador.
- Cabina d'operació: està dissenyada per obtenir la major estabilitat, visibilitat i protecció per a l'operari que treballa amb la màquina.



Imatge 4. Màquina de muntatge sobre erugues. Extret de Barber, P. (2003). *Maquinaria de obras públicas II: máquinas y equipos*.

## 4. Retroexcavadores hidráuliques

## **4. Retroexcavadores hidràuliques**

### **4.1. Definició**

S'anomena *retro* quan la pala conté l'obertura cap avall. Aquest equip està generalment destinat a les excavacions de poca i mitjana capacitat. La cullera és de dents intercanviables i amb unes fulles laterals, està muntada en l'extremitat del braç, articulada en el cap de la ploma, que a la seua vegada està articulada sobre la plataforma.

Pel que fa a la cullera, és fixa i de vegades basculant, sense comporta de buidat. En algunes màquines, la ploma es pot desplaçar lateralment.

### **4.2. Utilització**

La utilització de la retroexcavadora està definida pels treballs que pot dur a terme, com són:

- Extracció de material per sota del nivell del sòl, incloent el treball baix l'aigua.
- Excavació de rases estretes.
- Excavació de canals.
- Neteja de rases.
- Treball de demolició.
- Càrrega per als mitjans de transport.

### **4.3. Conducció**

El treball amb la retroexcavadora exigeix un nombre de precaucions que es defineixen a continuació:

- La pala ha de treballar necessàriament sobre terrenys de bona resistència, horitzontals o amb poca pendent.
- L'excavació no ha de realitzar-se molt a prop de la màquina, sobretot en terrenys que poden crear algun desprendiment.
- Sempre es treballarà amb estabilitzadors i amb els frens bloquejats.
- Quan s'arregue la cullera plena, s'ha d'evitar colpejar la ploma.
- S'ha de tindre en compte les precaucions habituals contra els riscos elèctrics.

#### 4.4. Procediments de treball

##### 4.4.1. Treballs per sota del sòl de recolzament

Tal com indica Barber (2003), en la majoria de treballs, la màquina roman en la part superior de l'excavació i l'actuació de l'equip es du a terme formant un pla amb una inclinació suficient per a que el terreny suporti la càrrega de la màquina i no es demore el talús. A continuació es parla dels diferents cicles de treball q pot realitzar la màquina:

1. **Excavació i càrrega del braç;** el casset recorre el front d'excavació de dalt a baix. Per a dur-ho a terme, el maquinista acciona els cilindres del braç d'excavació i s'ajuda per arrencar el material amb el cilindre d'actuació de la pala.
2. **Maniobra de gir, elevació de la ploma i posicionament del punt de descàrrega;** una vegada plena la pala, l'operador l'ha de girar per a que la càrrega no caiga i comença a elevar la ploma amb el braç arreplegat, al mateix temps ha de girar la plataforma per a buscar el punt de descàrrega prèviament indicat.
3. **Buidat del casset;** quan s'ha aplegat al punt de descàrrega, el casset s'inclina convenientment, desplegant-lo completament per a la descàrrega del material.
4. **Maniobra per a la posició d'excavació;** quan s'han realitzat aquestes maniobres, l'operari ha de buscar novament la posició d'excavació.

##### 4.4.2. Excavació per damunt del sòl de recolzament

Per a dur a terme aquest tipus de treballs, es començarà clavant el casset i a continuació, mitjançant el braç d'excavació, es realitzarà l'arrencament del material. Si en la realització del treball es troba alguna protuberància dura es pot arrencar mitjançant el gir del casset.

El material excavat s'ha d'amuntar al peu del tall, d'on seguidament s'arreplegarà amb la pala per a la seua càrrega, el que implica que el cicle de càrrega és independent del d'excavació.

#### **4.5. Recomanacions generals**

Si el desplaçament de la màquina es du a terme en terrenys inclinats, s'ha de tindre en compte que el cos superior de la maquinària estiga frenat, ja que del contrari existeix perill de bolcada.

D'altra banda, si la maquinària treballa sobre erugues o cadenes, és necessari que la màquina es recolze en superfícies horitzontals i sense protuberàncies, ja que dificulten el contacte i produeix inestabilitat. A més, s'han d'evitar els desplaçaments llargs i freqüents, ja que es perdria temps de treball i els rodatges de l'estructura que suporta la màquina poden sofrir tensions elevades. Si qualsevol part que forma la maquinària es debilita o trenca, els treballs i materials per a reparar-la són molt costosos.

Si pel contrari, la màquina treballa sobre rodes, aquestes, durant el treball, han d'estar ben posicionades i recolzades sobre el sòl, tant les rodes com els estabilitzadors, ja que del contrari, la màquina podria bolcar o sofrir estructuralment.

## 5. Funcionament del sistema hidràulic

A continuació s'explicarà el funcionament dels circuits hidràulics que conformen l'excavadora. Aquesta informació està extreta d'un treball de fi de carrera on s'explica també el funcionament d'una retroexcavadora, proporcionat pel tutor d'aquest TFG i citat a la bibliografia.

## **5. Funcionament del sistema hidràulic**

Els sistemes hidràulics són possibles pel fet que els líquids no es poden comprimir excepte en condicions de laboratori extremes. Per tant, la pressió que s'exercix sobre una part qualsevol del líquid s'exercirà en totes les parts del recipient.

### **5.1. Sistemes hidràulics**

Un sistema hidràulic generalment inclou un dipòsit, una bomba, una vàlvula de d'alleujament, vàlvules direccionals, un o més cilindres o motors i línies de connexió.

Es poden fer servir dos o més circuits hidràulics amb una sola bomba. No obstant això, si volem fer que treballen al mateix temps, primer haurà de treballar el que necessite menys pressió. Si la demanda de pressió és la mateixa, la bomba haurà de ser capaç d'alimentar-los tenint en compte la pèrdua de pressió i velocitat.

### **5.2. Bombes giratòries**

Les bombes que operen mecànicament a les excavadores solen ser giratòries, ja siguin d'engranatges o de paletes. La bomba d'engranatges consta de dos engranatges acoblats amb gran precisió i confinats per plaques laterals, que permeten el pas d'oli al voltant dels engranatges. Un d'aquests està acoblat al motor d'accionament i arrossega aquest moviment a l'altre engranatge.

Aquests engranatges giren en direccions oposades, creant un buit parcial en l'aspiració de la bomba, aquest buit permet que el líquid òmpliga l'espai existent entre els dents d'ambdós pinyons.

Quan engranen de nou les dents, cada pinyó entra en el lloc corresponent i desallotja del buit el líquid. Ja que el volum del buit és lleugerament major que el de la dent, certa quantitat de líquid retorna de nou a la cavitat d'aspiració.



Les càmeres de treball de la bomba estan tancades pel cos de la bomba i les plaques laterals, anomenades freqüentment plaques de pressió.

Per altra banda, el principi de funcionament de treball de la bomba de paletes és un rotor acoblat a l'eix d'accionament gira dins d'un anell ovalat. En les ranures d'aquest rotor estan disposades les paletes, que segueixen la superfície interna de l'anell quan el rotor gira. La força centrífuga i la pressió aplicada a la part inferior de les paletes les manté recolzades contra la càmera. Les càmeres de bombament es formen entre les paletes, rotor, anell i les dos plaques laterals.

Un buit parcial es crea en l'entrada de la bomba a mesura que va augmentant l'espai entre el rotor i l'anell. L'oli que entra en aquest espai queda tancat en les càmeres de bombament i és impulsat cap a l'eixida quan aquest espai disminueix. El desplaçament de la bomba depèn de l'amplària de l'anell i del rotor, i de l'excentricitat de tots dos. La majoria de les bombes de paletes de desplaçament fix que es construeixen actualment són equilibrades hidràulicament.

En produir-se desgast en la bomba, les pèrdues augmenten, encara que no necessàriament amb un ritme continu. El resultat serà una pèrdua de volum que serà major a altes pressions i una reducció de la pressió màxima a desenvolupar. La pèrdua de capacitat per a produir pressió no es fa notable fins que baixa respecte a l'ajust de la vàlvula limitadora. La disminució de volum pot resultar en un moviment proporcionalment més lent de càrregues lleugeres.

### **5.2.1. Definició de bomba volumètrica**

Les bombes utilitzades en els sistemes oleo-hidràulics són bombes volumètriques també denominades de desplaçament positiu. Una bomba de desplaçament positiu és aquella en la qual la impulsió del líquid es realitza mitjançant el desallotjament periòdic del mateix de les càmeres de treball pels actuadors o desplaçadors.

La càmera de treball d'una bomba volumètrica és l'espai que comunica alternativament amb la cavitat d'aspiració durant la càrrega, i amb la d'expulsió durant la impulsió. La bomba volumètrica consisteix, doncs, en el pas periòdic de determinats volums de líquid de la cavitat d'aspiració a la de descàrrega amb l'augment simultani de la pressió. Aquest pas de líquid, no és uniforme, per la qual cosa es considera generalment la mitjana de pas líquid en el temps.

Una altra particularitat de les bombes volumètriques és que la cavitat d'aspiració està aïllada hermèticament de la d'impulsió, la qual cosa no ocorre amb les centrífugues. Les bombes volumètriques només subministren cabal, imposant la pressió el sistema al que estan connectades, per les resistències que aquest ofereix al pas de cabal.

### 5.2.2. Paràmetres que defineixen una bomba volumètrica

Els paràmetres més importants que defineixen una bomba són:

- **Desplaçament per revolució.** És el cabal que impulsa una bomba en una volta completa al voltant del seu eix de gir. Es designa generalment amb la lletra  $C$ . Aquest serà igual al volum de les càmeres de treball, i matemàticament es podrà expressar com el volum d'una càmera de treball,  $W$ , pel nombre de càmeres de treball,  $Z$ . És a dir,  $C = W \cdot Z$ , expressat generalment en  $\text{cm}^3/\text{rev}$ .
- **Pressió màxima d'utilització.** És la màxima pressió que recomana el fabricant per al treball de la bomba.
- **Velocitat nominal de gir.** Indica la velocitat de rotació al fet que haurà de ser accionada la bomba; generalment es representa mitjançant la lletra  $N$  i se sol expressar en revolucions per minut.
- **Cabal d'impulsió.** És el cabal nominal impulsat per la bomba. L'anomenarem amb la lletra  $Q$  i acostuma a expressar-se en  $\text{L}/\text{min}$ .
- **Rendiment volumètric.** A mesura que augmenta la pressió de treball de la bomba augmenta el cabal de fugides, per la qual cosa el cabal real que impulsa la bomba és inferior al cabal teòric. Es defineix rendiment volumètric,  $\eta_v$ , d'una bomba com el quocient entre el cabal real i el teòric.
- **Potència útil o potència de la bomba.** És el producte de la pressió que subministra,  $p$ , i el cabal que impulsa,  $Q$ .
- **Potència absorbida.** És la potència absorbida per la bomba en el seu funcionament i serà igual a la cedida pel motor d'arrossegament.
- **Rendiment mecànic.** És el quocient entre la potència teòrica de la bomba,  $W_t$ , i la potència d'accionament o potència absorbida.
- **Rendiment global.** És el quocient entre la potència útil,  $W$ , subministrada per la bomba i la potència d'accionament,  $W_n$ .

### 5.3. Vàlvules limitadores de pressió

La major part dels sistemes hidràulics i també la major part dels sistemes de lubricació de motors depenen d'una vàlvula limitadora de pressió, també anomenada de seguretat, per a la seua bona operació. La bomba està construïda per a lliurar una pressió molt més alta de la qual pot usar el sistema, de manera que tindrà capacitat de reserva per a compensar danys i desgastos.

La vàlvula limitadora de pressió està ajustada per a la pressió que ha d'usar el sistema i vessa qualsevol excés, per mitjà d'un pas auxiliar, novament al recipient del líquid. La major part de les vàlvules limitadores de pressió fan soroll de cascavell o de xiscler quan s'obren, de manera que es pot fer una prova grollera del seu comportament operant la màquina.

El seu comportament normal és diferent per a diferents màquines, però sempre han d'obrir quan el mecanisme hidràulic es veu bloquejat per una càrrega. Si la pressió i volum de la bomba són molt elevats comparats amb els requisits del sistema, la vàlvula pot obrir sempre que el moviment siga retardat amb una càrrega.

Si la vàlvula obri a una pressió massa baixa, ja siga per un ressort feble o per ajust inadequat, la part hidràulica de la màquina operarà amb lentitud i amb potència menor que la normal. Si la vàlvula s'ajusta per a una pressió massa elevada, l'acció serà ràpida i violenta, generalment amb estirades; la potència serà major que la normal i amb freqüència hi ha trencament de mànegues.

La major part de les vàlvules limitadores de pressió són ajustables, necessitant-se llavors llevar una coberta de rosca i fer girar un caragol d'ajust que regula la tensió del ressort. Mentre més s'estrenya el ressort, major serà la pressió que es requereix per a obrir la vàlvula. L'ajust ha de tenir un efecte immediat en les lectures del manòmetre. Les vàlvules limitadores de pressió poden estar construïdes integralment en una bomba, una vàlvula o qualsevol part de la línia de pressió.

Aquestes vàlvules no provoquen una obertura immediata sinó que comença a obrir a una determinada pressió,  $p_A$ , denominada pressió d'obertura.

Així, quan és capaç de derivar la totalitat del cabal, la pressió pot ser considerablement major que la pressió d'obertura. La pressió a la qual la vàlvula obri totalment, deixant passar la totalitat del cabal, es denomina pressió de plena obertura,  $p_B$ , o pressió de regulació. Normalment la pressió d'obertura oscil·la entre el 70 i el 90 % de la pressió nominal de regulació. A la diferència entre la pressió d'obertura total i la pressió d'obertura se li denomina marge de sobre-pressió.

#### 5.4. Cilindres dels sistemes hidràulics

El principi en què es basa el funcionament dels cilindres hidràulics és el de Pascal, que estableix: “la pressió a l’interior d’un líquid confinat es transmet per igual en totes adreces”. S’encarreguen de convertir energia hidràulica de pressió, en energia mecànica. El treball del sistema s’efectua, generalment, per mitjà d’un o més cilindres, anomenats també gats o èmbols. En un cilindre d’acció simple, el fluid de la bomba sota pressió, és dirigit per la vàlvula a través de la canonades al cilindre. La seua pressió contra el pistó fa que aquest es moga. La vareta del pistó espenta la càrrega cap amunt.

Si es lleva la pressió, llavors la càrrega, braç i pistó descendeixen per gravetat, expulsant el líquid del cilindre. En un cilindre de doble acció (que és el tipus de cilindres que té la nostra màquina), els tubs entren per tots dos extrems. El fluid en ells està controlat de tal manera per la vàlvula que, si s’espenta en un extrem, puga eixir de l’altre. Com que la pressió pot aplicar-se en qualsevol extrem del pistó, aquest pot moure’s per l’aplicació de potència en tots dos sentits i no dependre de la gravetat per a l’acció de tornada.

No obstant açò, és la pressió de descens o de tornada menor que la d’ascens, a causa que el plançó del pistó redueix l’àrea del pistó que està en contacte amb l’oli, en el costat superior. Tot el cilindre està equipat amb passatges especials que permeten que l’oli envolte al pistó al final de la seua carrera, protegint així al sistema d’altes pressions momentànies en arribar a l’extrem.

Alguns pistons tenen empaquetatges al voltant del plançó, que s’ajusten per mitjà de dos o quatre caragols. Aquests, generalment, tenen caps perforats amb un filferro que els travessa, i que serveix per a evitar que giren, ja que no poden estrènyer-se el bastant per a mantenir-se en la seua posició.

Si l’empaquetatge s’escapoleix, s’estrenyen tots els caragols una mica cada vegada fins que cessa la fugida, provant repetidament pel moviment del plançó, entrant i eixint. L’ajust ideal consisteix a tenir una capa prima d’oli en la superfície del plançó. Si aquest ix totalment sec de l’empaquetatge, està massa atapeïda. Cal assegurar-se de tornar a col·locar el filferro de subjecció quan s’ha acabat l’ajust.

## 5.5. Tuberies i accessoris

La major part de les canonades flexibles en l'equip de construcció són mànegues de tipus d'alta pressió fetes de tela i metall. La seua resistència a la ruptura és molt major que la pressió que han de mantenir, però s'afebleixen per plecs o friccions repetides, de manera que poden rebentar-se en un moment donat. La vida útil varia amb la qualitat i resistència a la pressió que tinga la mànega, amb la seua flexibilitat, la pressió amb què treballa el radi de les seues corbes, el dels seus plecs i el nombre d'aquests, així com de la forma en què estiga instal·lada. Una mànega amb longitud inadequada pot convertir una bona instal·lació en dolenta.

Una mànega ha d'estar col·locada formant una corba suau, no ha de ser tan llarga que es projecte fora de la instal·lació ni tan curta que es forme un angle en la connexió. Si canvia l'angle quan treballa la màquina, ha d'ajustar-se la longitud per a la posició més usual. Una mànega s'escurça en augmentar la pressió en el seu interior, de manera que una corba correcta durant la instal·lació pot acusar un plec pronunciat sota pressió i la major part del dany que es produeix en les mànegues ocorre sota pressió. Les mànegues han de marcar-se amb una línia o algun altre dibuix que permeta observar si estan dretes.

Les connexions poden ser de rosca normal de canonada o de rosca fina. Mai ha de tractar-se de forçar rosques diferents. Tota mànega ha de tenir una connexió giratòria o unió en un extrem que es pugui estrènyer i afluixar sense torçar la mànega o el tub.

En instal·lar una mànega, l'extrem fix s'estreny abans que el giratori. Tota instal·lació de tub o canonada que comence i acabe en una connexió fixa ha de tenir una connexió giratòria intermèdia. Aquest és el lloc en què ha de començar a desarmar i l'última junta que ha d'armar-se. La connexió giratòria en una mànega, serveix tant per a la mànega mateixa com per a les canonades rígides connectades amb ella.

Amés, han d'usar-se dues claus en treballar en juntes articulades per a evitar torçar les canonades. Les millors són les claus espanyoles o ajustables; però si s'usa acuradament una Stillson, aquesta no ha de danyar els accessoris.

## 5.6. Conservació del sistema hidràulic

Els sistemes hidràulics probablement reben menys cura que qualsevol altra part l'equip. La major part dels operaris, molts caps i massa mecànics, consideren que l'única necessitat amb què s'enfronten és l'addició d'oli per a reposar les pèrdues i estrènyer ocasionalment les connexions o empaquetatges, a més de les reparacions quan es necessiten.

Un sistema hidràulic tindrà probablement una bomba que maneja més oli en un minut, que el que té tot el sistema. Aquesta ràpida circulació evita la sedimentació, per la qual cosa qualsevol material abrasiu que es trobe en l'oli està exercint el seu efectiu perjudicial, amb tota rapidesa. Açò significa que és molt important que l'oli estiga net. S'ha d'anar amb compte que no s'introduïska pols al sistema, i quasi qualsevol fugida d'oli permetrà l'entrada de brutícia. Els sistemes hidràulics moderns tenen generalment un filtre en el tanc o en la canonada d'oli a la bomba i un filtre en el respirador a través de com entra i ix aire al dipòsit en pujar i baixar el nivell d'oli.

És absolutament indispensable que aquests filtres es netegen i canvien periòdicament. L'oli ha de canviar-se als intervals recomanats pel fabricant, o una vegada a l'any, en absència d'aquesta recomanació. Quan es fan els canvis anuals, és preferible fer-ho a final de la tardor, ja que els defectes de l'oli són més nocius probablement en temps de fred i quan la màquina està parada.

D'altra banda, el llibre d'instruccions ha d'indicar la viscositat i tipus d'oli que ha d'usar-se i pot, fins i tot, recomanar les marques preferides. La major part dels sistemes usen un oli lubricant del número 10 per a temperatures normals, per exemple, entre – 12 a 32º C (10 a 90º F). Pot ser detergent (per a dièsel) o no detergent (ordinari o per a treball pesat automotriu). Però en la major part dels sistemes és important que no forme quantitats apreciables d'escuma quan s'agita.

És important que l'oli es mantinga a un nivell apropiat en el dipòsit. Si aquest és baix, algunes vegades succionarà la bomba, particularment si la màquina treballa en pendents o pis accidentat.

## 6. Construcció del model, dibuix i càlculs

## 6. Construcció del model, dibuix i càlculs

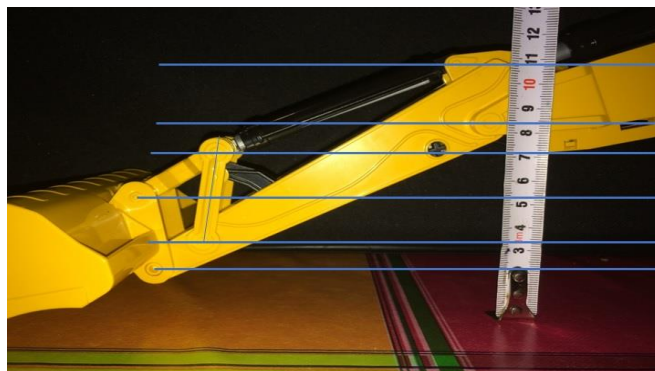
### 6.1. Obtenció de les dimensions

Per realitzar aquest treball partim d'una maqueta a escala de l'excavadora ja citada (Caterpillar M315C). Per conèixer aproximadament les dimensions de les distintes barres que conformen el mecanisme estudiat, s'ha fet ús d'un peu de rei per a saber les distàncies d'un parell de rotació a un altre.

S'ha de tindre present que les dimensions mai seran exactes, ja que el procés de recopilació de mesures no és molt precís. A continuació es mostren imatges de com s'han relacionat distàncies i mesures per a poder replicar el moviment de l'excavadora. S'ha fet ús del programa 'Microsoft Word' ja que permet dibuixar formes que s'adaptin a la forma dels elements, així s'han pogut mesurar angles i distàncies.



Imatge 5. Maqueta de l'excavadora Caterpillar M315C.



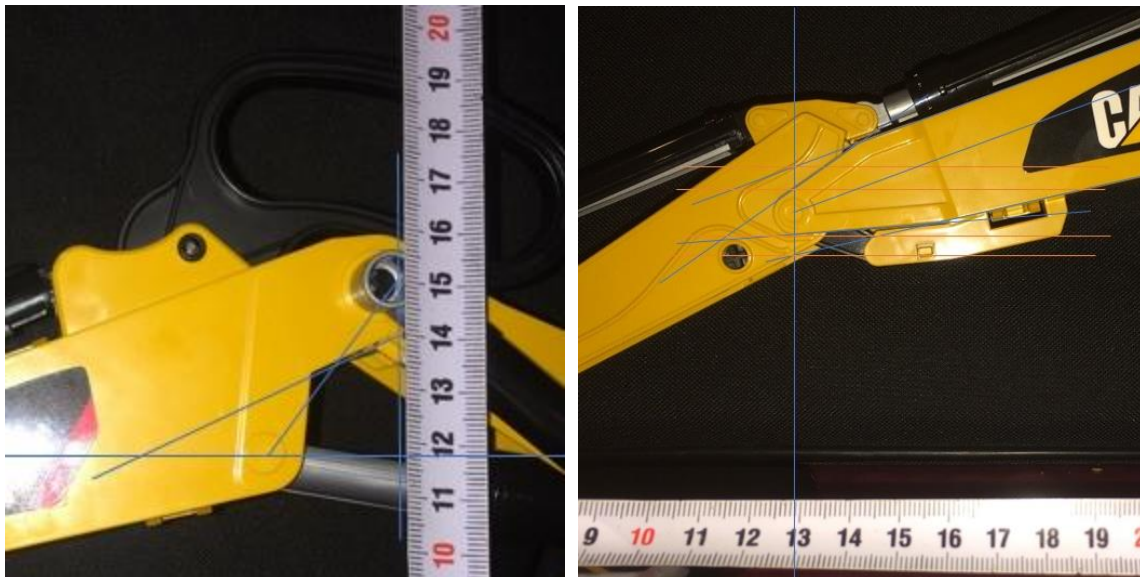
Imatge 6. Utilització de línies paral·leles per a la representació del model.





Imatge 7. Mesura de la longitud total del mecanisme

Com es pot observar a les imatges, amb línies i l'ajuda d'un metre per mesurar distàncies, es poden relacionar tant les dimensions de cada barra com les distàncies dels parells de rotació. Amb aquesta informació podrem més endavant dibuixar el mecanisme.



Imatge 8/9. Procediment per a l'obtenció dels angles del model.

Hem de recordar en aquest pas que les mesures proporcionades per les imatges no són reals, ja que es tracta d'una maqueta a escala 1:16, raó per la qual serà necessari

multiplicar les relacions obtingudes per 16. Així obtindrem les dimensions reals de l'excavadora, sabent que fent aquesta tasca l'error en els resultats obtinguts augmentarà. No s'intenta trobar la solució exacta en aquest TFG, ja que seria un procés molt més laboriós que el realitzat. Els resultats obtinguts en forma de gràfiques no serà l'exacte, però ens donarà una noció de com es pot comportar el conjunt de barres i cilindres.

## **6.2. Realització**

Per poder explicar amb detall el procés de dibuix i modelat del mecanisme d'actuació, és necessari desglossar aquesta informació fixant-se en l'apartat 1.4.2, on s'exposen els objectius específics del TFG.

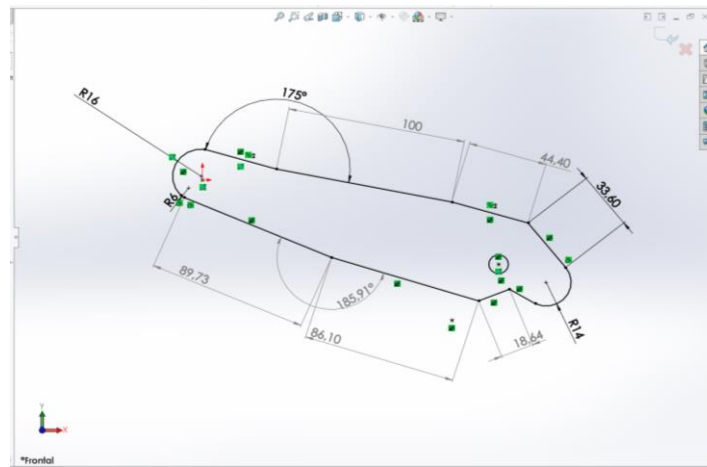
### **6.2.1. Dibuix del model 3D amb "SolidWorks"**

En primer lloc, s'explica què ens permet fer el programa 'SolidWorks'. Podem dir que aquesta eina facilita el disseny de tot tipus de peces i elements que conformen el mecanisme. Per aplegar al resultat desitjat, primerament s'ha de dibuixar un croquis aproximat de cada peça. Amb aquest croquis es podrà donar un volum als components perquè s'assembla el màxim possible a la realitat. Per a fer més real el disseny, s'ha buidat alguna de les peces, ja que si es vol fer un estudi exhaustiu podria ser rellevant per als resultats obtinguts.

A continuació es mostren algunes imatges de com s'han modelat els braços actuadors del mecanisme, totes aquestes estan tretes d'aquest programa informàtic.

#### **- Barra 1 o Ploma**

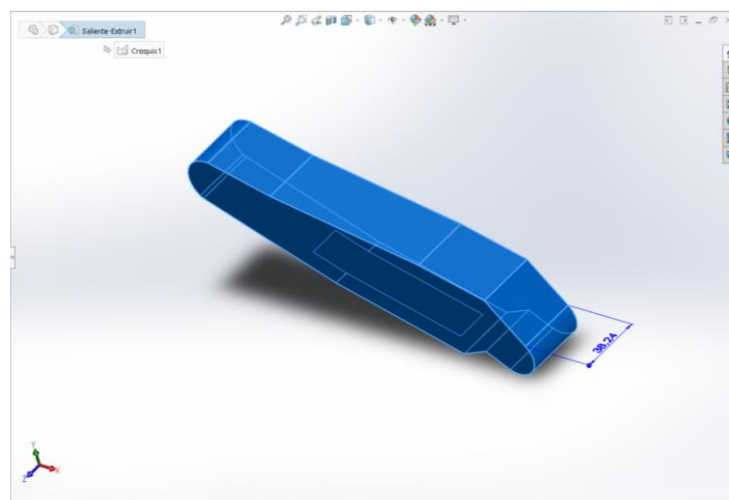
La ploma està directament fixada al bastidor mitjançant un punt d'ancoratge, aquest punt sols permet la rotació de la barra, que junt amb els altres elements conformarà el moviment de pujada i baixada de la pala. En l'extrem contrari, la ploma té un altre punt de rotació junt a la barra 2 que s'exposarà mes endavant. Per a poder realitzar aquest moviment, la ploma consta de 2 cilindres que permeten la rotació mitjançant l'expansió o compressió del líquid hidràulic que contenen.



Imatge 10. Croquis de la barra 1.

En la imatge anterior es poden observar algunes de les mesures de la ploma. Es tracta d'un croquis que primerament s'ha realitzat a mà, mesurant amb un peu de rei totes les arestes del model físic.

Aquesta peça té un accés complicat per a mesurar, però s'aproxima el més possible a la realitat, no obstant això, aquestes distàncies no són tan rellevants per a la resolució analítica calculades amb el mètode de llaços.



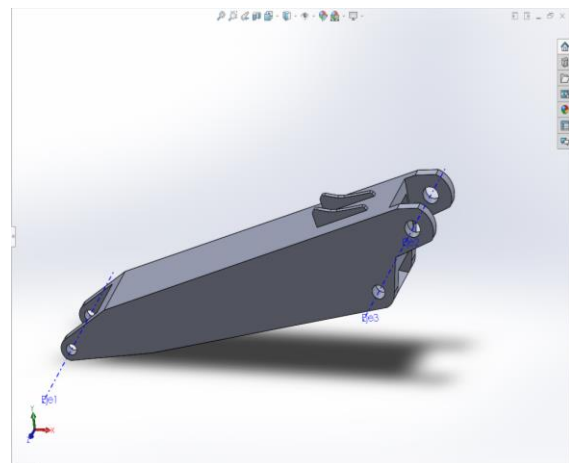
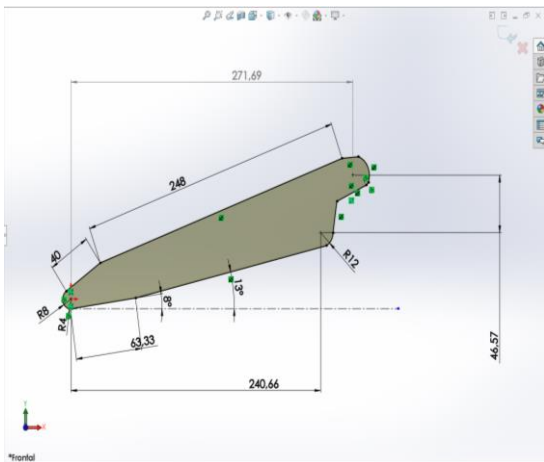
Imatge 11. Extrusió per donar espessor a la barra 1.

En aquesta imatge es pot observar el segon pas del procés de construcció del braç, es tracta d'una extrusió que s'utilitza per a conformar totes les peces del mecanisme estudiat. Aquesta eina del programa fa que la nostra peça no siga bidimensional i passe a ser en 3D, el que permet una millora en l'estudi respecte al cas 2D, ja que és més realista.

### - Barra 2

Aquesta peça fa que el braç que conté la pala es moga, tant per a treballs de càrrega com de descàrrega. La part inferior està suportada per un cilindre hidràulic que permet aquest moviment. El cilindre està fixat al seu extrem inferior al cos de la màquina, en aquesta unió també existeix un parell de rotació.

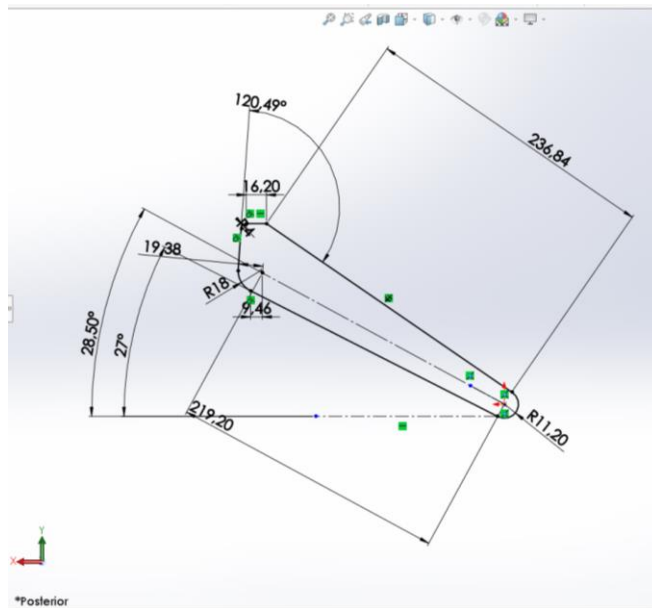
Al seu extrem superior tindrà un altre cilindre, que permetrà la rotació relativa entre aquesta barra i la barra que suporta la pala.



Imatge 12/13. Representació croquisada i extruïda de la barra 2.

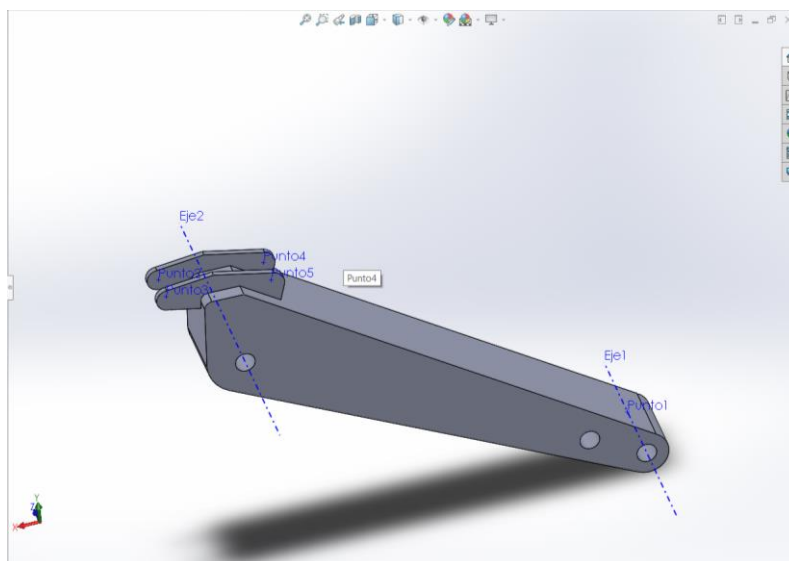
### - Barra 3 o Braç

Permet el moviment de la pala, la seua actuació està guiada per un altre cilindre hidràulic, situat en la part superior de la peça. Aquest parell prismàtic definirà els moviments que pot realitzar la pala.



Imatge 14. Croquis realitzat per a la construcció de la barra 3.

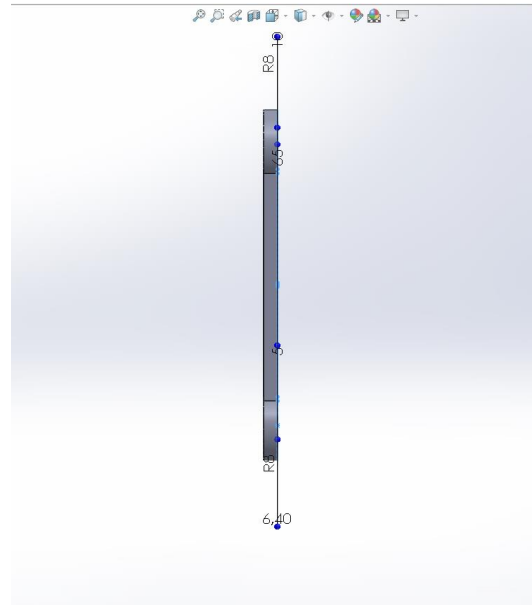
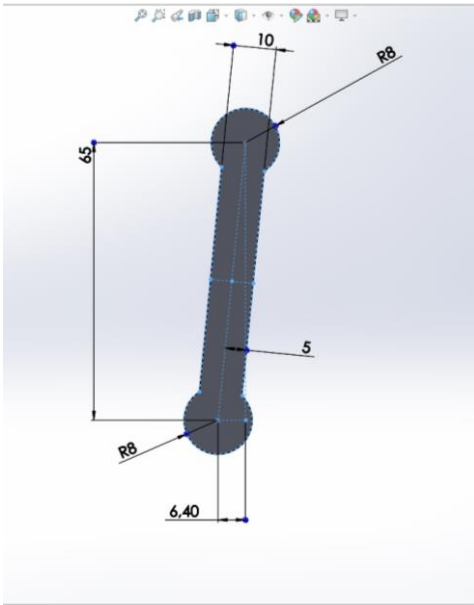
Després d’haver realitzat el croquis d’aquesta barra, s’ha dissenyat l’ancoratge que suporta el cilindre d’actuació. A més, com es pot observar, existeixen 3 punts en aquesta peça rellevants perquè tots els moviments siguin possibles. En els dos punts inferiors més pròxims unirem altres barres que formen un quadrilàter articulat, que ens permet gran varietat de moviments en una sola peça.



Imatge 15. Forma definitiva barra 3.

- Barra 4

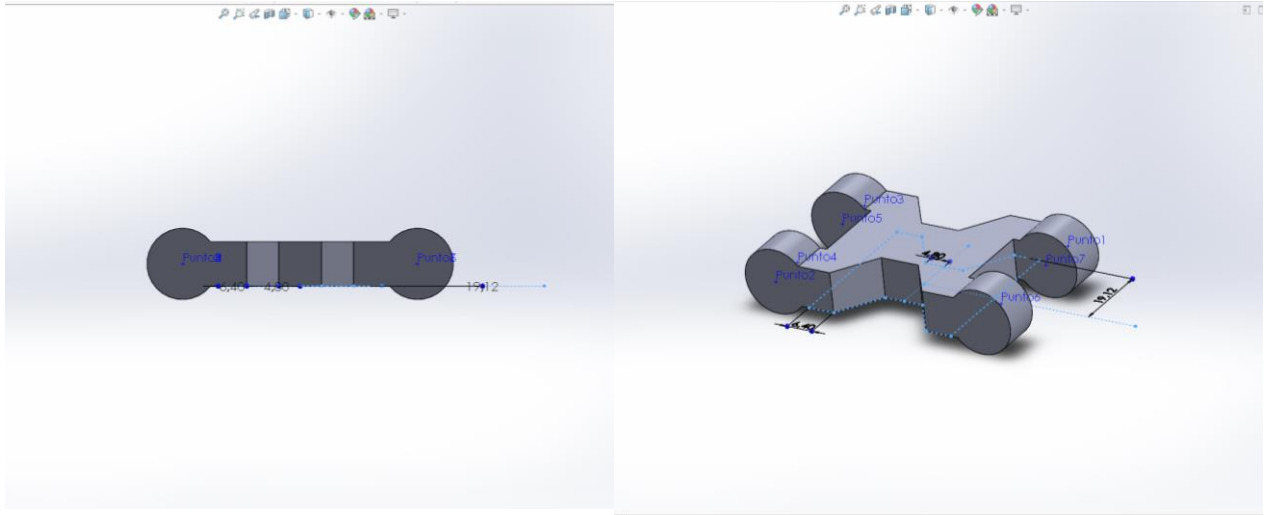
Aquesta barra forma l'articulació perquè la pala pugui girar respecte la barra 3, té dos parells de rotació, un amb el cilindre d'actuació de la barra 3 i l'altre amb la pròpia barra. El mecanisme porta dos peces com aquesta, una a cada part del braç. És un element del quadrilàter articulat anomenat anteriorment.



Imatge 16/17. Modelat barra 4.

- **Barra 5**

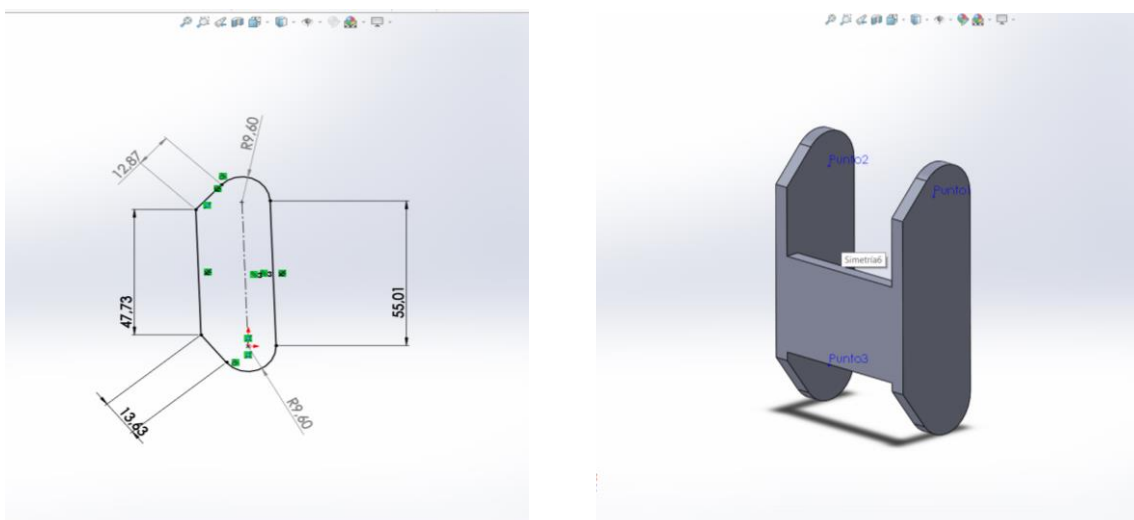
Aquesta peça està fixada directament al suport de la pala (barra 6) on hi ha un parell de rotació, a més, hi ha un altre d'aquests parells amb el cilindre d'actuació de la pala.



Imatge 18/19. Forma final barra 5.

- **Barra 6**

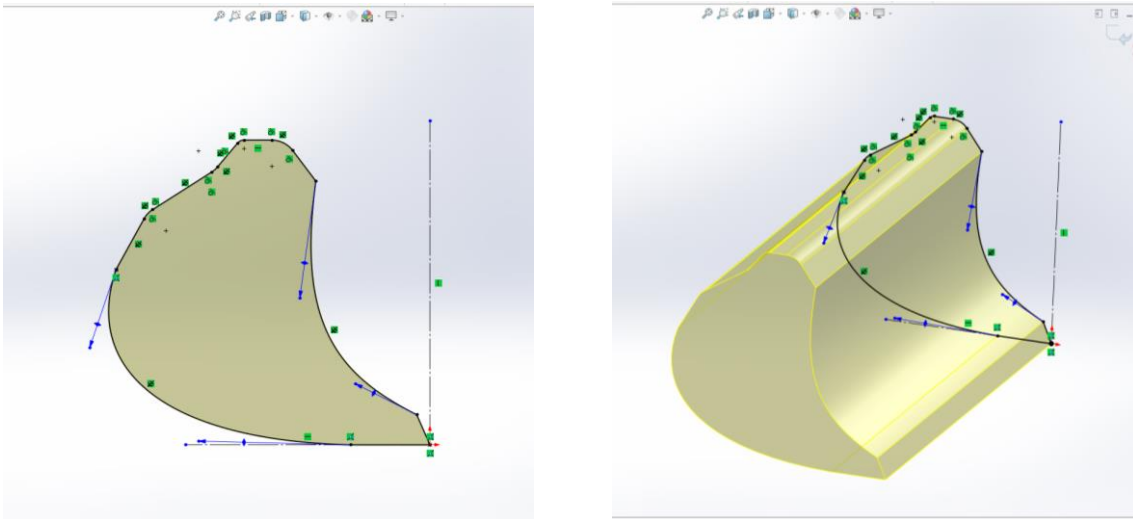
Aquest element forma el suport de la pala a l'estructura portant. És necessària per a connectar la pala amb la barra 5. Aquesta part va unida a la pala mitjançant una restricció de posició, raó per la qual treballen solidàries.



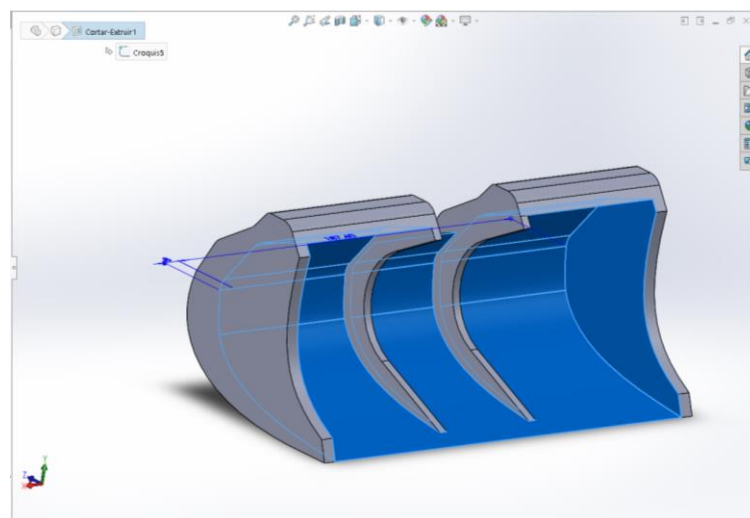
Imatge 20/21. Modelat de l'ancoratge de la pala.

## - Pala

Aquesta part del mecanisme permet la càrrega i descàrrega de material, el que fa útil tot el mecanisme modelat. La pala és de vital importància ja que és l'element més castigat de tot el mecanisme. Es tracta de l'element més complicat de modelar, ja que els buidats que té són complexos. Per a dibuixar el perímetre de la pala s'ha fet ús de *splines*, que ens dona l'oportunitat de modelar una corba amb molta facilitat.



Imatge 22/23. Croquisat i extrusió de la pala.



Imatge 24. Buidat interior de la pala.



## - **Assemblatge**

Quan s'han dibuixat tots els components que formen el braç d'excavació, s'haurà d'ajuntar tot aquest procés amb una eina pròpia del 'SolidWorks'. Aquesta eina ens permet relacionar les diferents barres de moltes maneres; tangències, coincidències, que dos punts siguin concèntrics i moltes més relacions de posició.

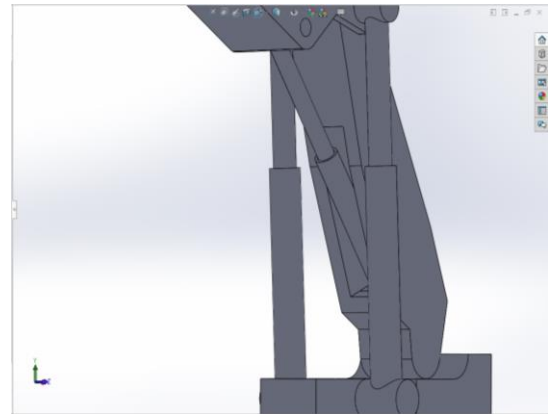
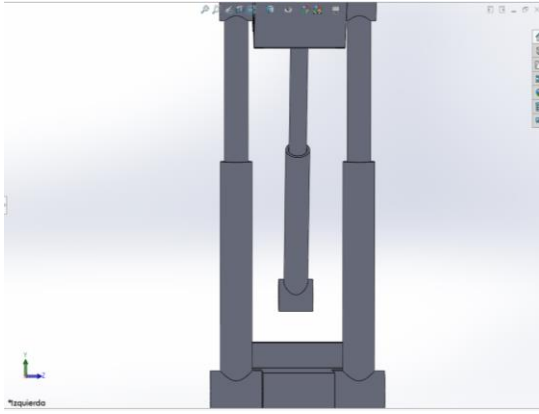
Així, unirem cada peça amb la que treballa conjuntament, i en definir aquestes relacions de posició, podrem obtenir un model que s'assembla a la realitat.

## - **Cilindres actuadors**

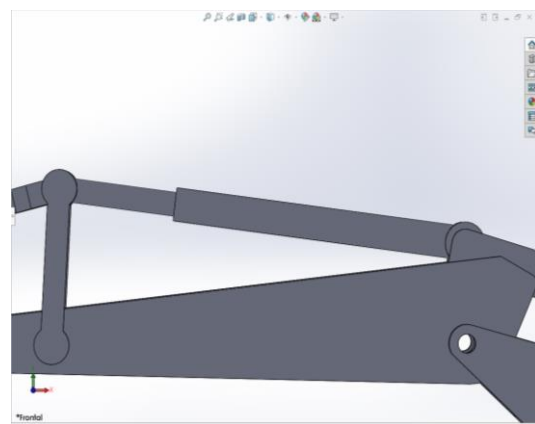
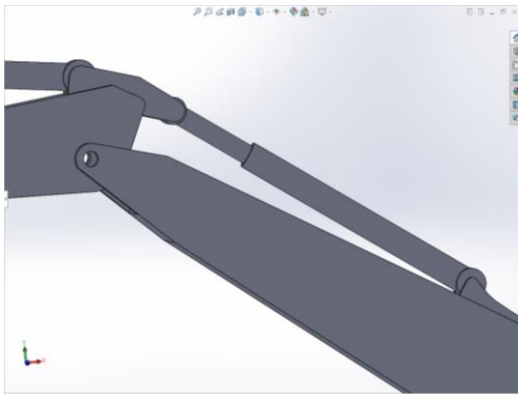
Cada cilindre té una funció específica dintre del treball de la maquinària. La màquina M315C en concret consta de cinc cilindres. Fixats a la cabina hi ha un parell de cilindres que treballen solidaris i suporten gran quantitat de l'esforç per poder fer la maniobra (cilindres 1.1 i 1.2). Aquests dos cilindres permeten el moviment de la ploma, el que fa possible l'extensió d'aquesta.

Sota la ploma existeix un altre cilindre que també suporta gran quantitat del pes total (cilindre 2), però aquest està unit a la barra 3 o braç, el que ens permet la rotació relativa de la barra 2 sobre la cabina. Aquesta barra 2 té damunt un altre cilindre (cilindre 4), que s'unirà al braç que conté la pala per a permetre la rotació relativa entre els dos cossos.

L'últim cilindre és el que fa moure's al quadrilàter articulat (cilindre 4), aquest cilindre fa que la pala rote junt amb les barres 5 i 6 sobre la barra 3. Més endavant, amb la utilització del programa 'Adams', es poden observar tant les forces que suporten aquests elements, com les velocitats o acceleracions a les que estan sotmeses. El que permet el treball desitjat dels cilindres és l'existència de parells prismàtics entre el pistó i la camisa que simulen els cilindres hidràulics. Per això s'ha optat per dibuixar cada cilindre amb dos components, cilindre i camisa.



Imatge 25/26. Visualització cilindres 1.1, 1.2 i 2.

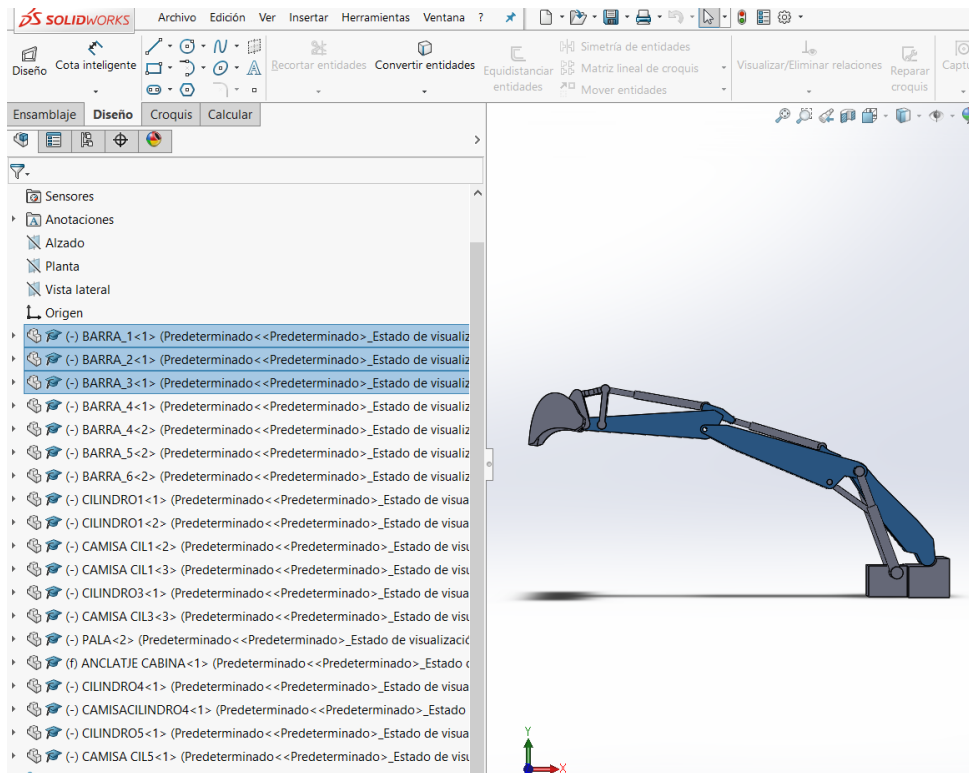


Imatge 27/28. Cilindres 2 i 3.

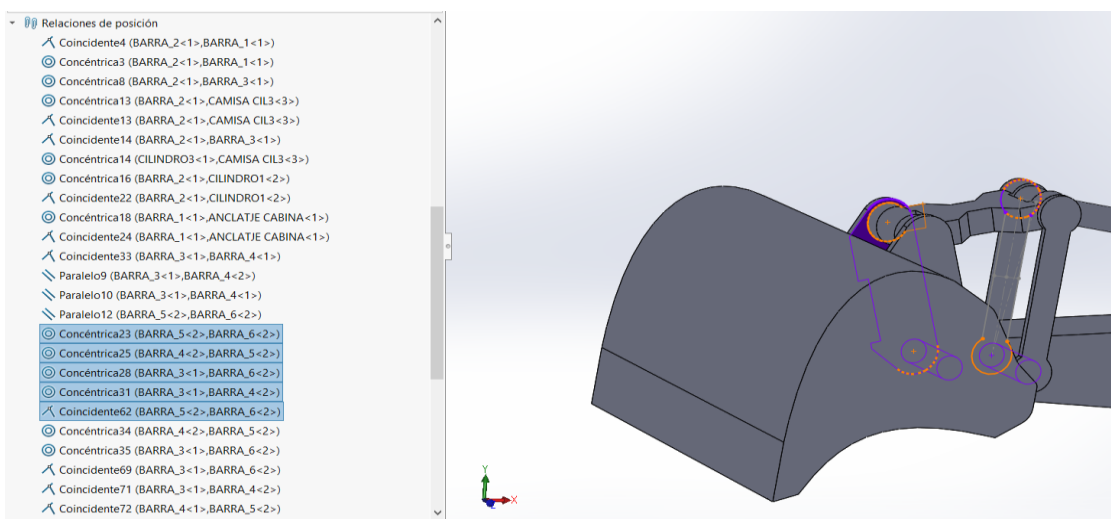


Imatge 29. Visualització de l'assemblatge.

Per finalitzar la tasca amb 'SolidWorks' es mostren imatges de l'arbre de construcció del model i algunes de les relacions de posició utilitzades. A més, per poder utilitzar aquest dibuix amb 'Adams', serà necessari guardar-lo amb extensió 'parasolid'. Aquest arxiu serà importat a 'Adams' i ens permetrà fer l'estudi de posició, velocitat i acceleració per a cadascun dels components.



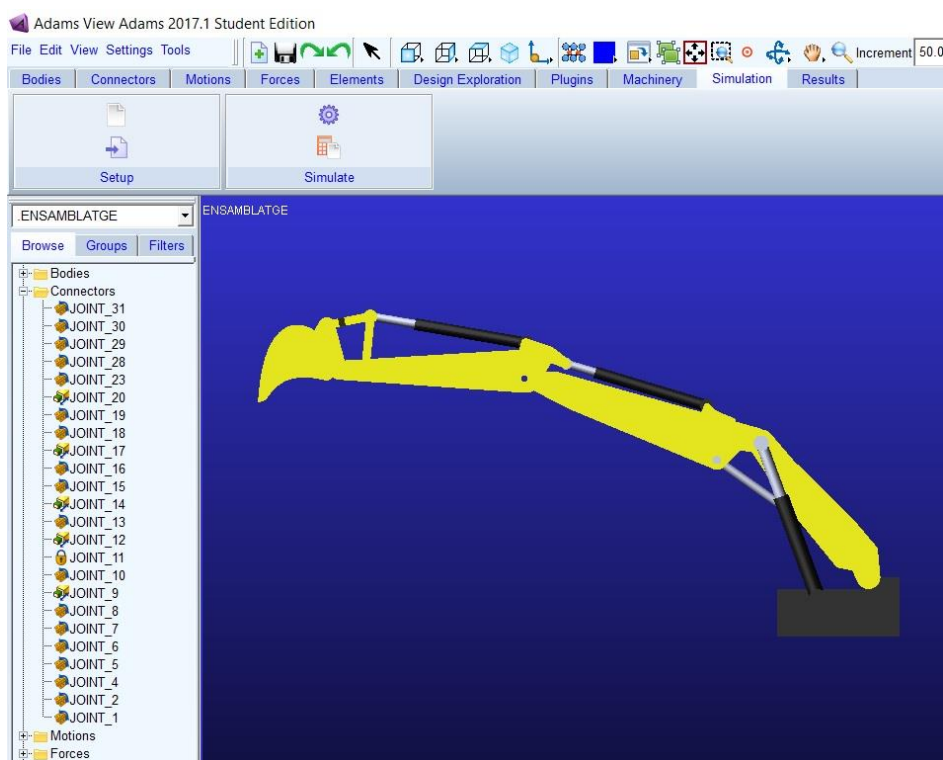
Imatge 30. Representació assemblatge amb les barres 1, 2 i 3 seleccionades.



Imatge 31. Exemple d'algunes de les relacions de posició existents.

## 6.2.2. Anàlisi de moviments amb 'Adams View'

Per a poder realitzar aquesta simulació el primer pas serà importar l'arxiu prèviament dissenyat amb 'SolidWorks'. Quan s'obriga l'assemblatge, la següent tasca serà introduir tots els parells de rotació de les distintes barres del mecanisme. A més, serà important també definir els parells prismàtics entre pistó i camisa que conformen els cilindres. Més endavant els parells prismàtics permetran l'adjudicació d'un moviment específic a l'element, que podrem definir mitjançant unes senzilles equacions. A continuació es mostra una imatge amb totes les relacions de moviment permeses en el model.

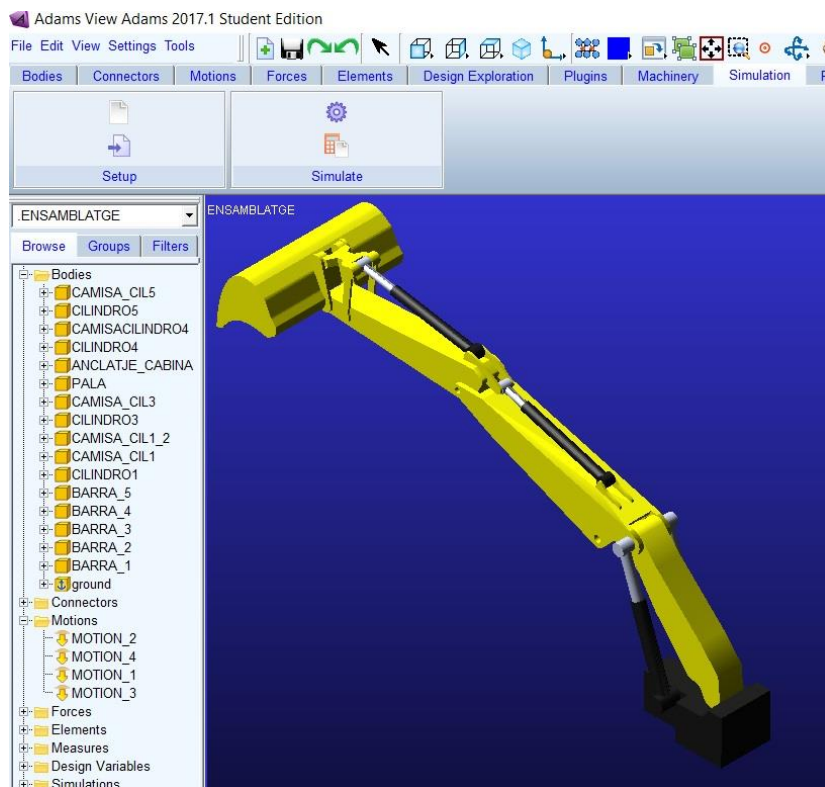


Imatge 32. Model importat amb adams, visualització dels parells cinemàtics.

Els parells estan representats a l'esquerra del programa, on també es poden veure els elements que formen el mecanisme o els moviments que pot assolir la màquina.

Com els cilindres 1.1 i 1.2 treballen solidaris, serà suficient definir sols un moviment per a aquests dos cilindres. Els moviments els podem definir a 'Adams' amb l'eina "motions", les quals editarem amb la funció *Step5*. La funció *Step5* és de la forma  $(x, x_0, h_0, x_1, h_1)$ ; on la variable  $x$  la definirem com "time", així controlarem el temps d'actuació

de cada cilindre, la  $x_0$  dependrà del moviment anterior i la  $x_1$  dependrà del temps on volem que pare el moviment. L'altra variable serà la 'h' que defineix el rang d'actuació de cada cilindre. S'expressa en mil·límetres i permet gran varietat de moviments. A continuació es mostra aquesta informació amb imatges recopilades directament del programa.

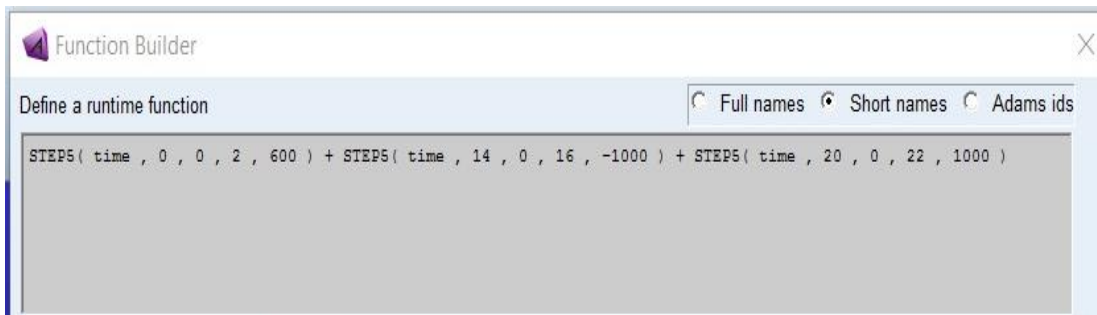


Imatge 33. Representació de les barres i dels moviments del mecanisme.

Per poder definir com toca el moviment de la màquina, utilitzarem l'eina *Function builder* que ens permet modificar amb molts tipus d'equacions i variables els moviments dels cilindres.

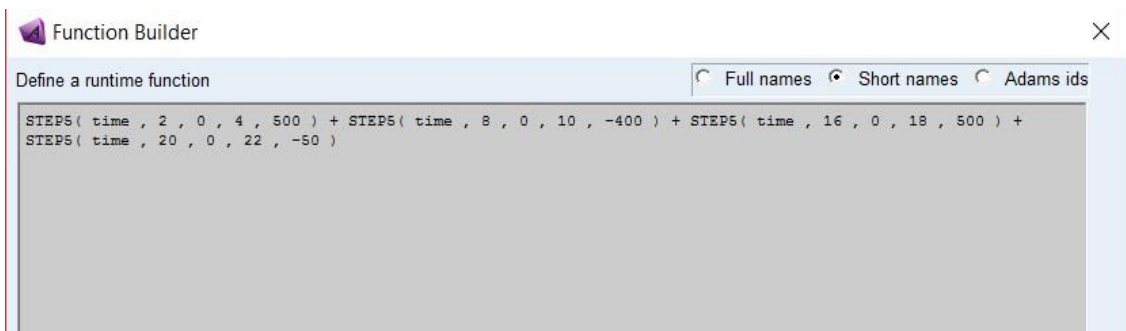
Les funcions utilitzades per a la realització dels moviments desitjats són:

- **Cilindres 1.1 i 1.2**



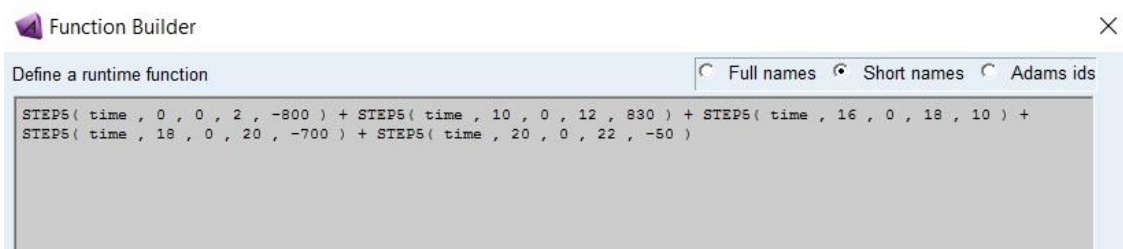
Imatge 34. Funcions utilitzades per al moviment dels cilindres 1.1 i 1.2.

- **Cilindre 2**



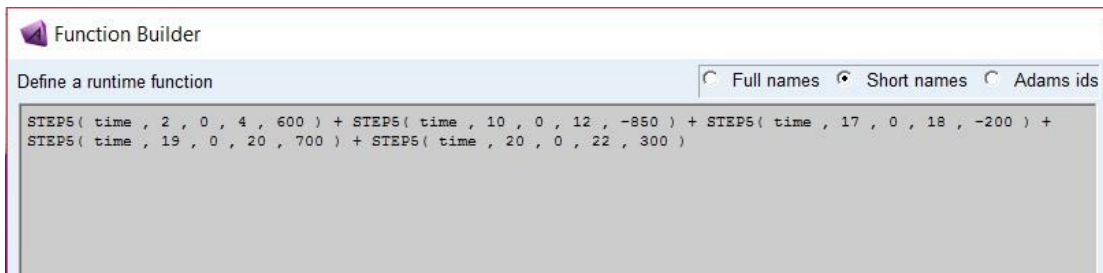
Imatge 35. Funcions que defineixen el moviment del cilindre 2.

- **Cilindre 3**



Imatge 36. Funcions utilitzades al cilindre 3.

## - Cilindre 4



Imatge 37. Sintaxi de les funcions que permeten el moviment desitjat del cilindre 4.

Quan s'han definit tots els moviments de la màquina i es fa la simulació, el programa permet dibuixar molts resultats; com són forces, moviments, posicions, trajectòries, velocitats...

Les gràfiques amb els resultats s'exposaran a l'apartat 7 del projecte (Obtenció de resultats i conclusions).

### 6.2.3. Resolució mètode analític amb la teoria de llaços i coordenades de Lagrange

Aquest estudi es realitzarà per donar una visió teòrica al model, no es trauran valors de velocitats i acceleracions ja que l'estudi es basa fonamentalment en el disseny estructural del mecanisme.

De tota manera, es desenvoluparan les equacions que defineixen el moviment del mecanisme com són les de posició, velocitat i acceleració, per si es desitja comparar amb exactitud les velocitats i acceleracions assolides pel sistema. Per realitzar aquest estudi utilitzarem la teoria de llaços que relaciona posicions mitjançant les coordenades de Lagrange.

Les coordenades de Lagrange són un sistema de coordenades que permet obtenir un model matemàtic d'un mecanisme, és a dir, un sistema d'equacions que el modelitza. Les coordenades que s'utilitzen són de dos tipus: independents ( $q_i$ ), en un nombre igual al de graus de llibertat del mecanisme, i dependents o secundàries ( $s_j$ ), que completen la ubicació de totes les barres del mecanisme. Les coordenades independents se solen associar a les barres d'entrada del mecanisme. Les equacions que relacionen les coordenades independents i les secundàries són les de restricció i s'obtenen a partir de la definició de llaços de vectors associats a les barres i parells cinemàtics del mecanisme.

El mètode utilitzat per a resoldre el problema de posició ens permet relacionar els vectors que defineixen la distància entre els parells de revolució i prismàtics amb els angles de les barres que conformen el mecanisme. Amb aquesta informació podrem obtenir la posició d'un punt qualsevol.

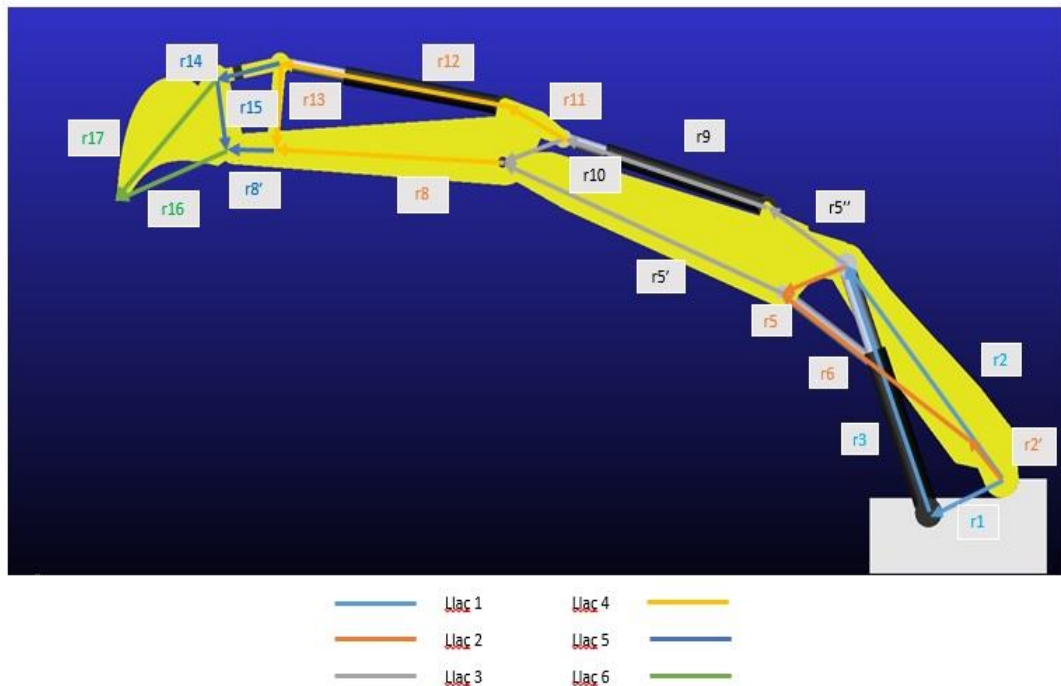
Si l'estudi és correcte, la posició que ens dona el mètode numèric haurà de coincidir amb les dades obtingudes amb 'Adams View', sabent que podran existir errors tant en la mesura de les barres com en la resolució de les equacions.

Per obtenir aquest estudi, és necessari definir prèviament els llaços independents del mecanisme, el que ens permetrà obtenir les equacions de restricció del sistema. Aquests llaços s'utilitzen per conèixer les magnituds dependents i independents del mecanisme.

Tenint en compte aquesta informació, es defineix quines magnituds quant a posició i gir són variables o constants. Al mecanisme es tenen 4 llaços independents, tants com cilindres actuadors hi ha al mecanisme i 2 llaços que depenen directament dels altres 4.



A continuació es mostra un esquema de com s'han numerat els llaços per a l'obtenció de les equacions de la màquina.



Imatge 38. Representació dels llaços del conjunt.

Per realitzar el pertinent estudi, definirem que vectors conformen cada llaç per estudiar-los independentment. Si alguna barra forma més d'un vector es nomenarà amb una extensió, com per exemple r5''.

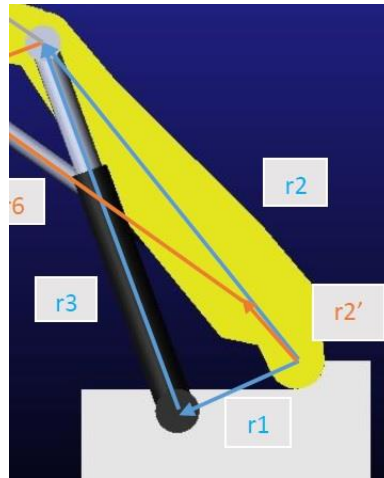
Les equacions formen un sistema d'equacions lineal mitjançant la teoria exposada de Newton-Raphson, que definirà les equacions de restricció del sistema modelat.

Primerament s'haurà de definir les variables del sistema, ens fixarem en mòdul (longitud) i orientació (girs) del mecanisme. Seguidament ens queda resoldre el sistema d'equacions.

Per a tindre més clar el procés d'estudi, es farà una graella per a descriure els moviments i distàncies de cada vector. Les distàncies estan extretes directament del programa 'SolidwWorks'.

L'equació que defineix cada vector és: 
$$r_x = r_x \cdot \cos(\theta_x) \cdot \vec{i} + r_x \cdot \sin(\theta_x) \cdot \vec{j}$$

- **Llaç 1**



Imatge 39. Obtenció llaç 1.

Vector	Des de	Fins a	Longitud	Orientació	Distància
$\vec{r}_1$	O <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	Fixa	Fixa	64,93 cm
$\vec{r}_2$	O <sub>2</sub>	A	Fixa	Variable	202,86 cm
$\vec{r}_3$	O <sub>3</sub>	A	Variable	Variable	194,49 cm

- **Posició**

$$\{q_1, s_1, s_2\} = \{r_3, \theta_2, \theta_3\}$$

Les equacions que determinen la posició dels vectors són:

$$\vec{r}_1 + \vec{r}_3 = \vec{r}_2 \text{ on}$$

$$\vec{r}_1 = r_1 \cdot \cos(\theta_1) \cdot \vec{i} + r_1 \cdot \sin(\theta_1) \cdot \vec{j}$$

$$\vec{r}_2 = r_2 \cdot \cos(\theta_2) \cdot \vec{i} + r_2 \cdot \sin(\theta_2) \cdot \vec{j}$$

$$\vec{r}_3 = r_3 \cdot \cos(\theta_3) \cdot \vec{i} + r_3 \cdot \sin(\theta_3) \cdot \vec{j}$$

Si substituïm les variables en les equacions anteriors tenim que:

$$\vec{r}_1 = r_1 \cdot \cos(\theta_1) \cdot \vec{i} + r_1 \cdot \sin(\theta_1) \cdot \vec{j}$$

$$\vec{r}_2 = r_2 \cdot \cos(s_1) \cdot \vec{i} + r_2 \cdot \sin(s_1) \cdot \vec{j}$$

$$\vec{r}_3 = q_1 \cdot \cos(s_2) \cdot \vec{i} + q_1 \cdot \sin(s_2) \cdot \vec{j}$$

Substituint en l'equació vectorial de restricció inicial  $\vec{r}_1 + \vec{r}_3 = \vec{r}_2$  :

$$x) r_1 \cdot \cos(\theta_1) + q_1 \cdot \cos(s_2) - r_2 \cdot \cos(s_1) = 0$$

$$y) r_1 \cdot \sin(\theta_1) + q_1 \cdot \sin(s_2) - r_2 \cdot \sin(s_1) = 0$$

Les equacions per a les velocitats s'obtenen derivant les equacions de restricció respecte del temps. Com que el temps no és una variable explícita de les equacions, s'ha d'aplicar la regla de la cadena per a la derivació.

#### - Velocitat

$$x) (\dot{q}_1 \cdot \cos(s_2) - q_1 \cdot \sin(s_2) \cdot \dot{s}_2) + (r_2 \cdot \sin(s_1) \cdot \dot{s}_1) = 0$$

$$y) (\dot{q}_1 \cdot \sin(s_2) + q_1 \cdot \cos(s_2) \cdot \dot{s}_2) - (r_2 \cdot \cos(s_1) \cdot \dot{s}_1) = 0$$

#### - Acceleració

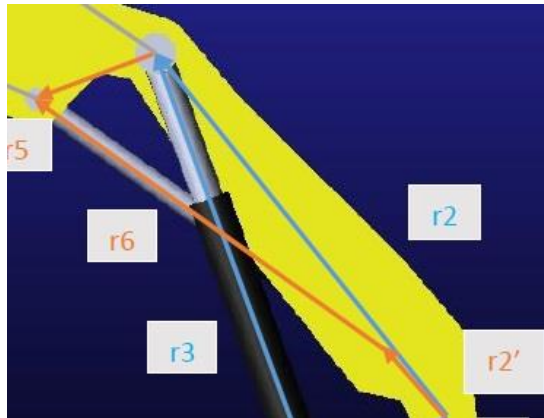
Si tornem a derivar les equacions anteriors respecte del temps obtenim les expressions que defineixen l'acceleració del mecanisme.

$$x) ([\ddot{q}_1 \cdot \cos(s_2) - \dot{q}_1 \cdot \sin(s_2) \cdot \dot{s}_2] - [\dot{q}_1 \cdot \sin(s_2) \cdot \dot{s}_2 + q_1 \cdot \sin(s_2) \cdot \ddot{s}_2 + q_1 \cdot \cos(s_2) \cdot \dot{s}_2] + [(r_2 \cdot \cos(s_1) \cdot \dot{s}_1) + r_2 \cdot \sin(s_1) \cdot \ddot{s}_1]) = 0$$

$$y) ([\ddot{q}_1 \cdot \sin(s_2) + \dot{q}_1 \cdot \cos(s_2) \cdot \dot{s}_2] + [\dot{q}_1 \cdot \cos(s_2) \cdot \dot{s}_2 + q_1 \cdot \sin(s_2) \cdot \ddot{s}_2 - q_1 \cdot \sin(s_2) \cdot \dot{s}_2] + [(-r_2 \cdot \sin(s_1) \cdot \dot{s}_1) + r_2 \cdot \cos(s_1) \cdot \ddot{s}_1]) = 0$$

En aquest cas  $\dot{q}_1$  i  $\ddot{q}_1$  representen la velocitat i acceleració que pot assolir el cilindre 1, ja que es tracta del primer grau de llibertat. Les variables  $s$  es refereixen a la velocitat i acceleració angular del mecanisme.

- **Llaç 2**



Imatge 40. Representació llaç 2.

Vector	Des de	Fins a	Longitud	Orientació	Distància
$\vec{r}_2$	O <sub>2</sub>	A	Fixa	Variable	202,86 cm
$\vec{r}'_2$	O <sub>2</sub>	B	Fixa	Variable	28,63 cm
$\vec{r}_5$	A	C	Fixa	Variable	55,96 cm
$\vec{r}_6$	B	C	Variable	Variable	195,49 cm

- **Posició**

$$\{q_2, s_1, s_3, s_4\} = \{r_6, \theta_2, \theta_5, \theta_6\}$$

$$\vec{r}'_2 + \vec{r}_6 = \vec{r}_2 + \vec{r}_5 \text{ on tenim que:}$$

$$\vec{r}'_2 = r'_2 \cdot \cos(\theta'_2) \cdot \vec{i} + r'_2 \cdot \sin(\theta'_2) \cdot \vec{j}$$

$$\vec{r}_6 = r_6 \cdot \cos(\theta_6) \cdot \vec{i} + r_6 \cdot \sin(\theta_6) \cdot \vec{j}$$

$$\vec{r}_2 = r_2 \cdot \cos(\theta_2) \cdot \vec{i} + r_2 \cdot \sin(\theta_2) \cdot \vec{j}$$

$$\vec{r}_5 = r_5 \cdot \cos(\theta_5) \cdot \vec{i} + r_5 \cdot \sin(\theta_5) \cdot \vec{j}$$

Substituint les variables obtenim les següents equacions:

$$\vec{r}'_2 = r'_2 \cdot \cos(\theta'_2) \cdot \vec{i} + r'_2 \cdot \sin(\theta'_2) \cdot \vec{j}$$

$$\vec{r}_6 = q_2 \cdot \cos(s_4) \cdot \vec{i} + q_2 \cdot \sin(s_4) \cdot \vec{j}$$

$$\vec{r}_2 = r_2 \cdot \cos(s_1) \cdot \vec{i} + r_2 \cdot \sin(s_1) \cdot \vec{j}$$

$$\vec{r}_5 = r_5 \cdot \cos(s_3) \cdot \vec{i} + r_5 \cdot \sin(s_3) \cdot \vec{j}$$

I si agrupem en coordenades x i y :

$$x) r'_2 \cdot \cos(\theta'_2) + q_2 \cdot \cos(s_4) - r_2 \cdot \cos(s_1) - r_5 \cdot \cos(s_3) = 0$$

$$y) r'_2 \cdot \sin(\theta'_2) + q_2 \cdot \sin(s_4) - r_2 \cdot \sin(s_1) - r_5 \cdot \sin(s_3) = 0$$

#### - Velocitat

$$x) (-r'_2 \cdot \sin(\theta'_2) \cdot \dot{\theta}'_2) + (\dot{q}_2 \cdot \cos(s_4) - q_2 \cdot \sin(s_4) \cdot \dot{s}_4) - r_2 \cdot \sin(s_1) \cdot \dot{s}_1 + (r_5 \cdot \sin(s_3) \cdot \dot{s}_3) = 0$$

$$y) (r'_2 \cdot \cos(\theta'_2) \cdot \dot{\theta}'_2) + (\dot{q}_2 \cdot \sin(s_4) + q_2 \cdot \cos(s_4) \cdot \dot{s}_4) - (r_2 \cdot \cos(s_1) \cdot \dot{s}_1) - (r_5 \cdot \cos(s_3) \cdot \dot{s}_3) = 0$$

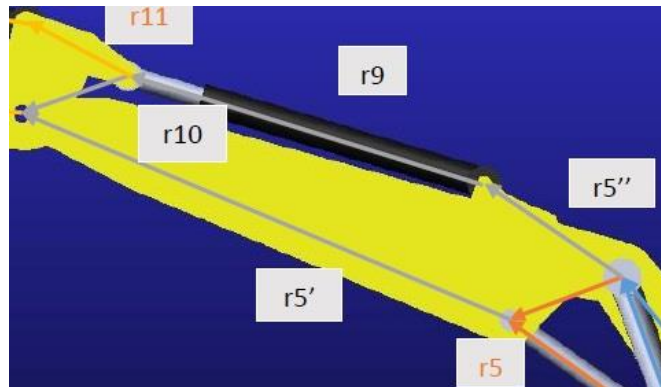
#### - Acceleració

$$x) ([\sin(\theta'_2) \cdot \dot{\theta}'_2 \cdot r'_2 - r'_2 \cdot \sin(\theta'_2) \cdot \ddot{\theta}'_2] + [\ddot{q}_2 \cdot \cos(s_4) - \dot{q}_2 \cdot \sin(s_4) - \dot{q}_2 \cdot \sin(s_4) \cdot \dot{s}_4 + q_2 \cdot \cos(s_4) \cdot \dot{s}_4 - q_2 \cdot \sin(s_4) \cdot \ddot{s}_4] - [(r_2 \cdot \cos(s_1) \cdot \dot{s}_1) + r_2 \cdot \sin(s_1) \cdot \ddot{s}_1] + r_5 \cdot \cos(s_3) \cdot \ddot{s}_3 + r_5 \cdot \sin(s_3) \cdot \dot{s}_3) = 0$$

$$y) ([-\sin(\theta'_2) \cdot \dot{\theta}'_2 \cdot r'_2 + r'_2 \cdot \cos(\theta'_2) \cdot \ddot{\theta}'_2] + [\ddot{q}_2 \cdot \sin(s_4) + \dot{q}_2 \cdot \cos(s_4) - \dot{q}_2 \cdot \cos(s_4) \cdot \dot{s}_4 - q_2 \cdot \sin(s_4) \cdot \dot{s}_4 + q_2 \cdot \cos(s_4) \cdot \ddot{s}_4] + [(r_2 \cdot \sin(s_1) \cdot \dot{s}_1) + r_2 \cdot \cos(s_1) \cdot \ddot{s}_1] + r_5 \cdot \cos(s_3) \cdot \ddot{s}_3 - r_5 \cdot \sin(s_3) \cdot \dot{s}_3) = 0$$

Si calculem els angles de les barres implicades en aquest llaç podríem obtenir els valors de la velocitat i acceleració del cilindre 2 en aquest llaç.

- Llaç 3



Imatge 41. Representació vectorial Llaç 3.

Vector	Des de	Fins a	Longitud	Orientació	Distància
$\vec{r}_5$	A	C	Fixa	Variable	59,16 cm
$\vec{r}'_5$	C	F	Fixa	Variable	246,67 cm
$\vec{r}''_5$	A	D	Fixa	Variable	78,03 cm
$\vec{r}_9$	D	E	Variable	Variable	173,23 cm
$\vec{r}_{10}$	E	F	Fixa	Variable	52,27 cm

- Posició

$$\{q_3, s_3, s_5, s_6, s_7\} = \{r_9, \theta_5, \theta_5'', \theta_9, \theta_{10}\}$$

$$\vec{r}_5 + \vec{r}'_5 = \vec{r}''_5 + \vec{r}_9 + \vec{r}_{10}$$

Les equacions són:

$$\vec{r}_5 = r_5 \cdot \cos(\theta_5) \cdot \vec{i} + r_5 \cdot \sin(\theta_5) \cdot \vec{j}$$

$$\vec{r}'_5 = r'_5 \cdot \cos(\theta'_5) \cdot \vec{i} + r'_5 \cdot \sin(\theta'_5) \cdot \vec{j}$$

$$\vec{r}''_5 = r''_5 \cdot \cos(\theta''_5) \cdot \vec{i} + r''_5 \cdot \sin(\theta''_5) \cdot \vec{j}$$

$$\vec{r}_9 = r_9 \cdot \cos(\theta_9) \cdot \vec{i} + r_9 \cdot \sin(\theta_9) \cdot \vec{j}$$

$$\vec{r}_{10} = r_{10} \cdot \cos(\theta_{10}) \cdot \vec{i} + r_{10} \cdot \sin(\theta_{10}) \cdot \vec{j}$$

Si substituïm per les variables definides obtindrem:

$$\begin{aligned}\vec{r}_5 &= r_5 \cdot \cos(s_3) \cdot \vec{i} + r_5 \cdot \sin(s_3) \cdot \vec{j} \\ \vec{r}'_5 &= r'_5 \cdot \cos(\theta'_5) \cdot \vec{i} + r'_5 \cdot \sin(\theta'_5) \cdot \vec{j} \\ \vec{r}''_5 &= r''_5 \cdot \cos(s_5) \cdot \vec{i} + r''_5 \cdot \sin(s_5) \cdot \vec{j} \\ \vec{r}_9 &= q_3 \cdot \cos(s_6) \cdot \vec{i} + q_3 \cdot \sin(s_6) \cdot \vec{j} \\ \vec{r}_{10} &= r_{10} \cdot \cos(s_7) \cdot \vec{i} + r_{10} \cdot \sin(s_7) \cdot \vec{j}\end{aligned}$$

I per últim si s'agrupa en coordenades x i y tenim:

$$\begin{aligned}\text{x) } r_5 \cdot \cos(s_3) + r'_5 \cdot \cos(\theta'_5) - r''_5 \cdot \cos(s_5) - q_3 \cdot \cos(s_6) - r_{10} \cdot \cos(s_7) &= 0 \\ \text{y) } r_5 \cdot \sin(s_3) + r'_5 \cdot \sin(\theta'_5) - r''_5 \cdot \sin(s_5) - q_3 \cdot \sin(s_6) - r_{10} \cdot \sin(s_7) &= 0\end{aligned}$$

#### - Velocitat

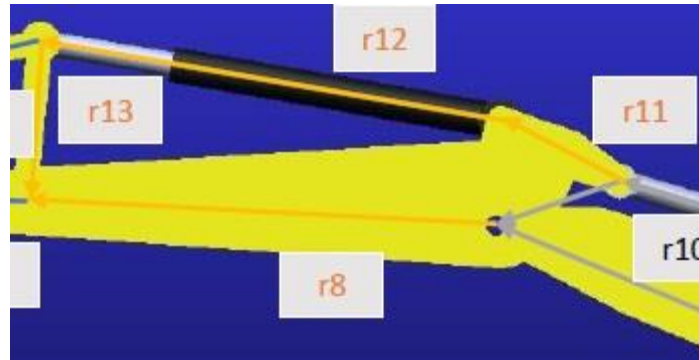
$$\begin{aligned}\text{x) } (-r_5 \cdot \sin(s_3) \cdot \dot{s}_3) + (-r_5 \cdot \sin(\theta'_5) \cdot \dot{\theta}'_5) - r''_5 \cdot \sin(s_5) \cdot \dot{s}_5 - (\dot{q}_3 \cdot \cos(s_6) - q_3 \cdot \sin(s_6) \cdot \dot{s}_6) - (-r_{10} \cdot \sin(s_7) \cdot \dot{s}_7) &= 0 \\ \text{y) } (r_5 \cdot \cos(s_3) \cdot \dot{s}_3) + (r_5 \cdot \cos(\theta'_5) \cdot \dot{\theta}'_5) - (r''_5 \cdot \cos(s_5) \cdot \dot{s}_5) - (\dot{q}_3 \cdot \sin(s_6) + q_3 \cdot \cos(s_6) \cdot \dot{s}_6) - (r_{10} \cdot \cos(s_7) \cdot \dot{s}_7) &= 0\end{aligned}$$

#### - Acceleració

$$\begin{aligned}\text{x) } ([\cos(s_3) \cdot \dot{s}_3 \cdot r_5 - r_5 \cdot \sin(s_3) \cdot \ddot{s}_3] + [-r_5 \cdot \cos(\theta'_5) \cdot \ddot{\theta}'_5 - r_5 \cdot \sin(\theta'_5) \cdot \ddot{\theta}'_5] - [r''_5 \cdot \cos(s_5) \cdot \dot{s}_5 + r''_5 \cdot \sin(s_5) \cdot \ddot{s}_5] - [\ddot{q}_3 \cdot \cos(s_6) - \dot{q}_3 \cdot \sin(s_6)] - [(-r_{10} \cdot \cos(s_7) \cdot \dot{s}_7) - r_{10} \cdot \sin(s_7) \cdot \ddot{s}_7]) &= 0 \\ \text{y) } ([\sin(s_3) \cdot \dot{s}_3 \cdot r_5 + r_5 \cdot \cos(s_3) \cdot \ddot{s}_3] - [-r_5 \cdot \sin(\theta'_5) \cdot \ddot{\theta}'_5 + r_5 \cdot \cos(\theta'_5) \cdot \ddot{\theta}'_5] + [r''_5 \cdot \sin(s_5) \cdot \dot{s}_5 - r''_5 \cdot \cos(s_5) \cdot \ddot{s}_5] + [\ddot{q}_3 \cdot \sin(s_6) + \dot{q}_3 \cdot \cos(s_6)] + [(-r_{10} \cdot \sin(s_7) \cdot \dot{s}_7) + r_{10} \cdot \cos(s_7) \cdot \ddot{s}_7]) &= 0\end{aligned}$$

Amb aquestes equacions obtenim les velocitats i acceleracions de les barres implicades i del cilindre 3. Si es volgués fer un estudi detallat dels moviments aquestes equacions ens permetrien fer-ho.

- **Llaç 4**



Imatge 42. Obtenció del llaç 4.

Vector	Des de	Fins a	Longitud	Orientació	Distància
$\vec{r}_8$	F	I	Fixa	Variable	188,07 cm
$\vec{r}_{10}$	E	F	Fixa	Variable	52,27 cm
$\vec{r}_{11}$	E	G	Fixa	Variable	53 cm
$\vec{r}_{12}$	G	H	Variable	Variable	186,09 cm
$\vec{r}_{13}$	H	I	Fixa	Variable	65,31 cm

- **Posició**

$$\{q_4, s_7, s_9, s_{10}, s_{11}\} = \{\vec{r}_{12}, \theta_{10}, \theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}\}$$

L'equació que defineix aquest llaç és:

$$\vec{r}_{11} + \vec{r}_{12} + \vec{r}_{13} = \vec{r}_{10} + \vec{r}_8 \quad \text{i definint els vectors com abans:}$$

$$\vec{r}_{11} = r_{11} \cdot \cos(\theta_{11}) \cdot \vec{i} + r_{11} \cdot \sin(\theta_{11}) \cdot \vec{j}$$

$$\vec{r}_{12} = r_{12} \cdot \cos(\theta_{12}) \cdot \vec{i} + r_{12} \cdot \sin(\theta_{12}) \cdot \vec{j}$$

$$\vec{r}_{13} = r_{13} \cdot \cos(\theta_{13}) \cdot \vec{i} + r_{13} \cdot \sin(\theta_{13}) \cdot \vec{j}$$

$$\vec{r}_{10} = r_{10} \cdot \cos(\theta_{10}) \cdot \vec{i} + r_{10} \cdot \sin(\theta_{10}) \cdot \vec{j}$$

$$\vec{r}_8 = r_8 \cdot \cos(\theta_8) \cdot \vec{i} + r_8 \cdot \sin(\theta_8) \cdot \vec{j}$$



Substituint i agrupant:

$$\text{x) } r_{11} \cdot \cos(s_9) + q_4 \cdot \cos(s_{10}) + r_{13} \cdot \cos(s_{11}) - r_{10} \cdot \cos(s_7) - r_8 \cdot \cos(\theta_8) = 0$$

$$\text{γ) } r_{11} \cdot \sin(s_9) + q_4 \cdot \sin(s_{10}) + r_{13} \cdot \sin(s_{11}) - r_{10} \cdot \sin(s_7) - r_8 \cdot \sin(\theta_8) = 0$$

- **Velocitat**

$$\text{x) } (-r_{11} \cdot \sin(s_9) \cdot \dot{s}_9) + (\dot{q}_4 \cdot \cos(s_{10}) - q_4 \cdot \sin(s_{10}) \cdot \dot{s}_{10}) - (-r_{13} \cdot \sin(s_{11}) \cdot \dot{s}_{11}) - (-r_{10} \cdot \sin(s_7) \cdot \dot{s}_7) - (-r_8 \cdot \sin(\theta_8) \cdot \dot{\theta}_8) = 0$$

$$\text{γ) } (r_{11} \cdot \cos(s_9) \cdot \dot{s}_9) + (\dot{q}_4 \cdot \sin(s_{10}) + q_4 \cdot \cos(s_{10}) \cdot \dot{s}_{10}) - (r_{13} \cdot \cos(s_{11}) \cdot \dot{s}_{11}) - (r_{10} \cdot \cos(s_7) \cdot \dot{s}_7) - (r_8 \cdot \cos(\theta_8) \cdot \dot{\theta}_8) = 0$$

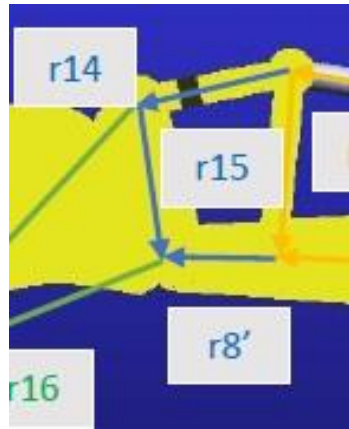
- **Acceleració**

$$\text{x) } [-r_{11} \cdot \cos(s_9) \cdot \ddot{s}_9 - r_{11} \cdot \sin(s_9) \cdot \dot{s}_9] + [\ddot{q}_4 \cdot \cos(s_{10}) - \dot{q}_4 \cdot \cos(s_{10}) - \dot{q}_4 \cdot \sin(s_{10}) \cdot \dot{s}_{10} - q_4 \cdot \cos(s_{10}) \cdot \ddot{s}_{10} - q_4 \cdot \sin(s_{10}) \cdot \dot{s}_{10}] - [-r_{13} \cdot \cos(s_{11}) \cdot \dot{s}_{11} - r_{13} \cdot \sin(s_{11}) \cdot \ddot{s}_{11}] - [(-r_{10} \cdot \cos(s_7) \cdot \dot{s}_7) - r_{10} \cdot \sin(s_7) \cdot \ddot{s}_7] - [(-r_8 \cdot \cos(\theta_8) \cdot \dot{\theta}_8 - r_8 \cdot \sin(\theta_8) \cdot \ddot{\theta}_8)] = 0$$

$$\text{γ) } [r_{11} \cdot \sin(s_9) \cdot \dot{s}_9 + r_{11} \cdot \cos(s_9) \cdot \ddot{s}_9] + [\ddot{q}_4 \cdot \sin(s_{10}) + \dot{q}_4 \cdot \sin(s_{10}) + \dot{q}_4 \cdot \cos(s_{10}) \cdot \dot{s}_{10} + q_4 \cdot \sin(s_{10}) \cdot \ddot{s}_{10} + q_4 \cdot \cos(s_{10}) \cdot \dot{s}_{10}] + [-r_{13} \cdot \sin(s_{11}) \cdot \dot{s}_{11} - r_{13} \cdot \cos(s_{11}) \cdot \ddot{s}_{11}] + [(-r_{10} \cdot \sin(s_7) \cdot \dot{s}_7) - r_{10} \cdot \cos(s_7) \cdot \ddot{s}_7] + [(-r_8 \cdot \sin(\theta_8) \cdot \dot{\theta}_8 - r_8 \cdot \cos(\theta_8) \cdot \ddot{\theta}_8)] = 0$$

Si fem la resolució dels 4 sistemes descrits fins ara, obtenim les velocitats i acceleracions dels 4 cilindres que conformen l'excavadora. També obtindríem els valors de les velocitats i acceleracions que depenen directament d'aquests moviments.

- Llaç 5



Imatge 43. Representació vectorial llaç 5.

Vector	Des de	Fins a	Longitud	Orientació	Distància
$\vec{r}'_8$	I	K	Fixa	Variable	31,14 cm
$\vec{r}_{13}$	H	I	Fixa	Variable	65,31 cm
$\vec{r}_{14}$	H	J	Fixa	Variable	52,81 cm
$\vec{r}_{15}$	J	K	Fixa	Variable	55,05 cm

- Posició

$$\{s_{12}, s_{11}, s_{13}, s_{14}\} = \{\theta'_8, \theta_{13}, \theta_{14}, \theta_{15}\}$$

L'equació definida per aquest llaç és:

$$\vec{r}_{14} + \vec{r}_{15} = \vec{r}_{13} + \vec{r}'_8 \quad \text{d'on sabem que:}$$

$$\vec{r}_{14} = r_{14} \cdot \cos(\theta_{14}) \cdot \vec{i} + r_{14} \cdot \sin(\theta_{14}) \cdot \vec{j}$$

$$\vec{r}_{15} = r_{15} \cdot \cos(\theta_{15}) \cdot \vec{i} + r_{15} \cdot \sin(\theta_{15}) \cdot \vec{j}$$

$$\vec{r}_{13} = r_{13} \cdot \cos(\theta_{13}) \cdot \vec{i} + r_{13} \cdot \sin(\theta_{13}) \cdot \vec{j}$$

$$\vec{r}'_8 = r'_8 \cdot \cos(\theta'_8) \cdot \vec{i} + r'_8 \cdot \sin(\theta'_8) \cdot \vec{j}$$

Si substituïm les variables i agrupem en x i y:

$$x) r_{14} \cdot \cos(s_{13}) + r_{15} \cdot \cos(s_{14}) - r_{13} \cdot \cos(s_{11}) - r'_8 \cdot \cos(\theta'_8) = 0$$

$$y) r_{14} \cdot \sin(s_{13}) + r_{15} \cdot \sin(s_{14}) - r_{13} \cdot \sin(s_{11}) - r'_8 \cdot \sin(\theta'_8) = 0$$

- **Velocitat**

$$x) (-r_{14} \cdot \sin(s_{13}) \cdot \dot{s}_{13}) + (-r_{15} \cdot \sin(s_{14}) \cdot \dot{s}_{14}) - r_{13} \cdot \sin(s_{11}) \cdot \dot{s}_{11} - (-r'_8 \cdot \sin(\theta'_8) \cdot \dot{\theta}'_8) = 0$$

$$y) (r_{14} \cdot \cos(s_{13}) \cdot \dot{s}_{13}) + (r_{15} \cdot \cos(s_{14}) \cdot \dot{s}_{14}) - (r_{13} \cdot \cos(s_{11}) \cdot \dot{s}_{11}) - (r'_8 \cdot \cos(\theta'_8) \cdot \dot{\theta}'_8) = 0$$

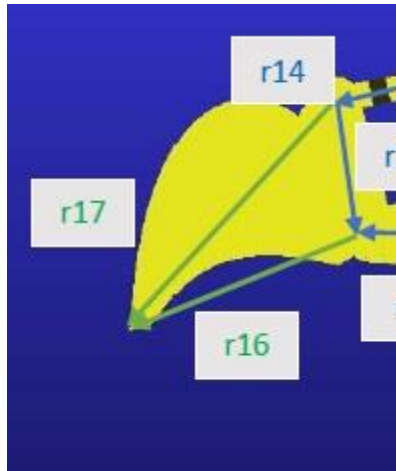
- **Acceleració**

$$x) [(-r_{14} \cdot \cos(s_{13}) \cdot \dot{s}_{13} - r_{14} \cdot \sin(s_{13}) \cdot \ddot{s}_{13})] + [(-r_{15} \cdot \cos(s_{14}) \cdot \dot{s}_{14} - r_{15} \cdot \sin(s_{14}) \cdot \ddot{s}_{14})] - [r_{13} \cdot \cos(s_{11}) \cdot \dot{s}_{11} + r_{13} \cdot \sin(s_{11}) \cdot \ddot{s}_{11}] - [(r'_8 \cdot \cos(\theta'_8) \cdot \dot{\theta}'_8) - r'_8 \cdot \sin(\theta'_8) \cdot \ddot{\theta}'_8] = 0$$

$$y) [(-r_{14} \cdot \sin(s_{13}) \cdot \dot{s}_{13} + r_{14} \cdot \cos(s_{13}) \cdot \ddot{s}_{13})] - [(r_{15} \cdot \sin(s_{14}) \cdot \dot{s}_{14} - r_{15} \cdot \cos(s_{14}) \cdot \ddot{s}_{14})] + [r_{13} \cdot \sin(s_{11}) \cdot \dot{s}_{11} - r_{13} \cdot \cos(s_{11}) \cdot \ddot{s}_{11}] + [(r'_8 \cdot \sin(\theta'_8) \cdot \dot{\theta}'_8) + r'_8 \cdot \cos(\theta'_8) \cdot \ddot{\theta}'_8] = 0$$

Com podem observar a aquestes equacions, el llaç 5 està lligat a tots els moviments dels cilindres anteriors, açò ho sabem perquè no existeix cap variable 'q' en les velocitats i acceleracions.

- **Llaç 6**



Imatge 44. Vectors que conformen el llaç 6.

Vector	Des de	Fins a	Longitud	Orientació	Distància
$\vec{r}_{15}$	J	K	Fixa	Variable	55,05 cm
$\vec{r}_{16}$	J	L	Fixa	Variable	122,75 cm
$\vec{r}_{17}$	K	L	Fixa	Variable	130,19 cm

- **Posició**

Aquest últim llaç serà:

$\{s_{14}, s_{15}, s_{16},\} = \{\theta_{15}, \theta_{16}, \theta_{17}\}$  i la equació que defineix el llaç:

$\vec{r}_{16} = \vec{r}_{15} + \vec{r}_{17}$  on tenim que:

$$\vec{r}_{16} = r_{16} \cdot \cos(\theta_{16}) \cdot \vec{i} + r_{16} \cdot \sin(\theta_{16}) \cdot \vec{j}$$

$$\vec{r}_{15} = r_{15} \cdot \cos(\theta_{15}) \cdot \vec{i} + r_{15} \cdot \sin(\theta_{15}) \cdot \vec{j}$$

$$\vec{r}_{17} = r_{17} \cdot \cos(\theta_{17}) \cdot \vec{i} + r_{17} \cdot \sin(\theta_{17}) \cdot \vec{j}$$

Així doncs, si agrupem en coordenades x i y i substituïm:

$$x) r_{16} \cdot \cos(s_{15}) - r_{15} \cdot \cos(s_{14}) - r_{17} \cdot \cos(s_{16}) = 0$$

$$y) r_{16} \cdot \sin(s_{15}) - r_{15} \cdot \sin(s_{14}) - r_{17} \cdot \sin(s_{16}) = 0$$

- **Velocitat**

$$x) (-r_{16} \cdot \sin(s_{15}) \cdot \dot{s}_{15}) - (-r_{15} \cdot \sin(s_{14}) \cdot \dot{s}_{14}) - r_{17} \cdot \sin(s_{16}) \cdot \dot{s}_{16} = 0$$

$$y) (r_{16} \cdot \cos(s_{15}) \cdot \dot{s}_{15}) - (r_{15} \cdot \cos(s_{14}) \cdot \dot{s}_{14}) - (r_{17} \cdot \cos(s_{16}) \cdot \dot{s}_{16}) = 0$$

- **Acceleració**

$$x) [(-r_{16} \cdot \cos(s_{15}) \cdot \dot{s}_{15} - r_{16} \cdot \sin(s_{15}) \cdot \ddot{s}_{15})] - [(-r_{15} \cdot \cos(s_{14}) \cdot \dot{s}_{14} - r_{15} \cdot \sin(s_{14}) \cdot \ddot{s}_{14})] - [r_{17} \cdot \cos(s_{16}) \cdot \dot{s}_{16} + r_{17} \cdot \sin(s_{16}) \cdot \ddot{s}_{16}] = 0$$

$$y) [(-r_{16} \cdot \sin(s_{15}) \cdot \dot{s}_{15} + r_{16} \cdot \cos(s_{15}) \cdot \ddot{s}_{15})] - [(-r_{15} \cdot \sin(s_{14}) \cdot \dot{s}_{14} + r_{15} \cdot \cos(s_{14}) \cdot \ddot{s}_{14})] + [r_{17} \cdot \sin(s_{16}) \cdot \dot{s}_{16} - r_{17} \cdot \cos(s_{16}) \cdot \ddot{s}_{16}] = 0$$

Com podem veure, aquest últim llaç tampoc conté cap variable independent, per la qual cosa podem determinar que depèn directament dels altres 5.

## 7. Obtenció de resultats i conclusions

## 7. Obtenció de resultats i conclusions

### 7.1. Obtenció de resultats

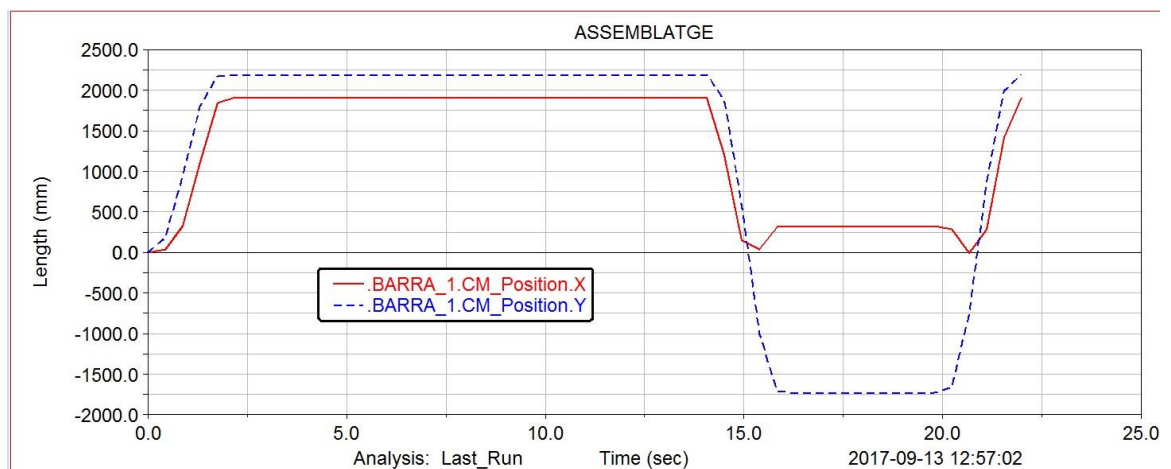
Per a obtenir els resultats caldrà utilitzar l'eina proporcionada en 'Adams View', que ens permet dibuixar les gràfiques que defineixen posicions, velocitats, acceleracions ... Aquesta eina és 'Postprocessor' i ens permet visualitzar forces i distàncies tant de les barres com els parells cinemàtics i moviments imposats al sistema.

Les desglossarem per parts, primerament s'exposaran moviments, velocitats i acceleracions de les barres i més endavant es farà un estudi dels parells i dels moviments del mecanisme. Abans de realitzar aquesta tasca s'haurà de simular el moviment que assolix la màquina.

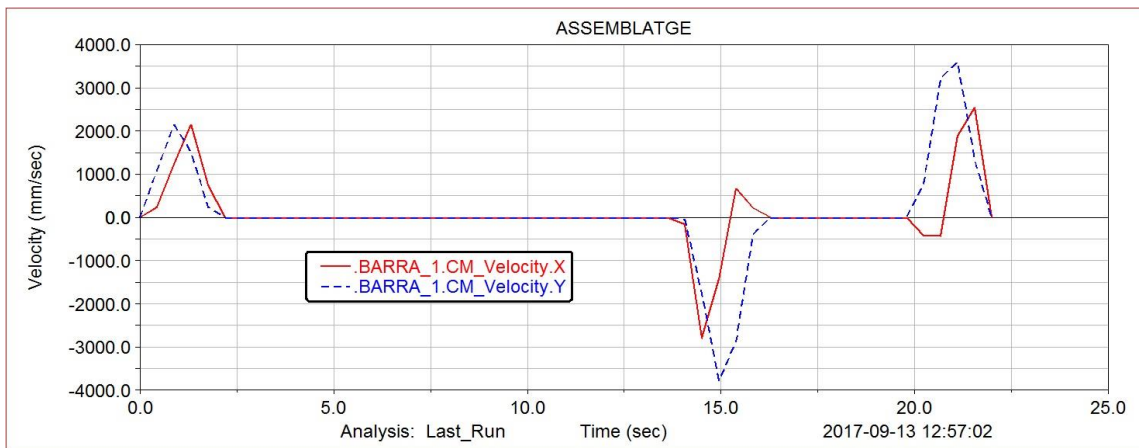
Ens fixarem en el centre de masses de cada part, així obtindrem de forma gràfica els resultats del mecanisme.

Per a les barres el procediment serà el mateix per a totes: es dibuixaran les gràfiques de posició, velocitat i acceleració del centre de masses en els eixos X i Y, més endavant es representaran les gràfiques de velocitat i acceleració angular compreses en l'eix Z.

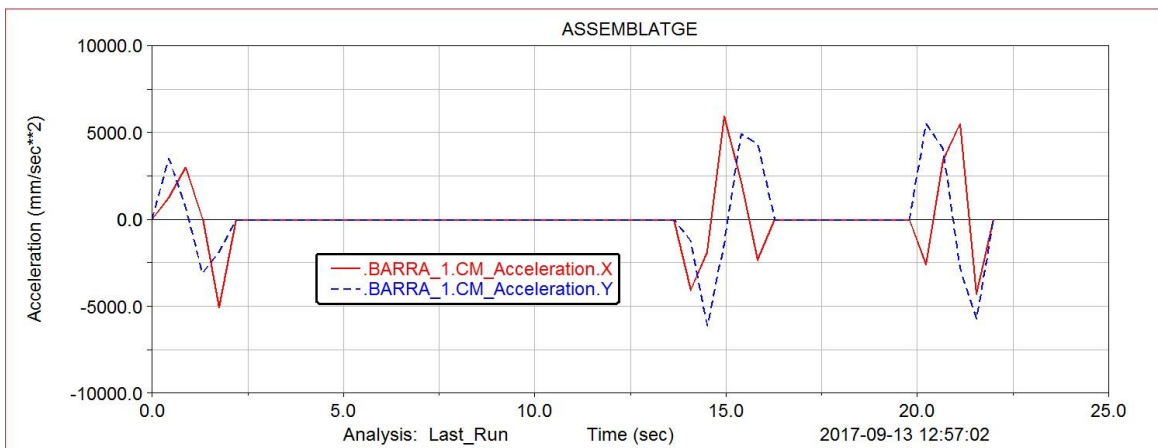
#### - Barra 1



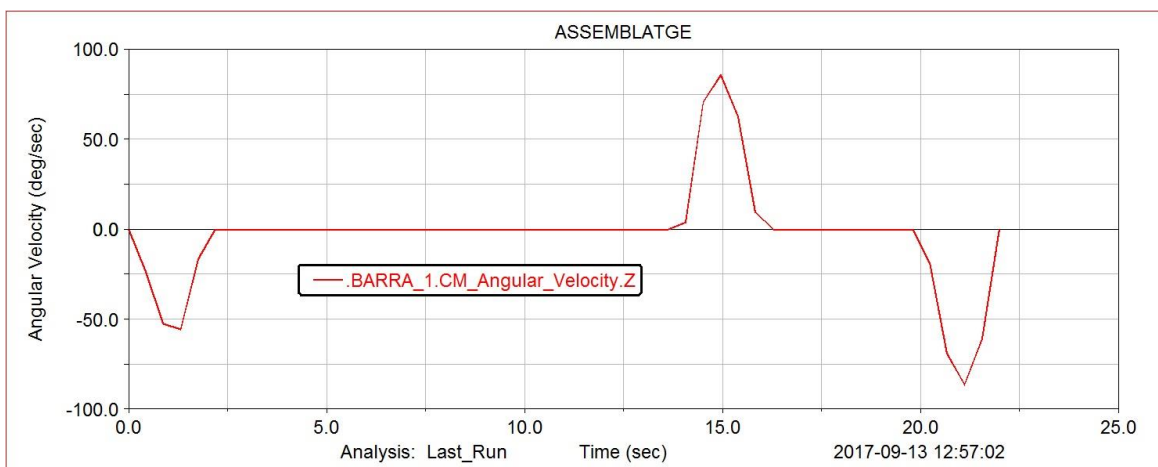
Imatge 45. Posició del centre de masses de la barra 1 respecte del temps.



Imatge 46. Velocitat del centre de masses de la barra 1 respecte del temps.

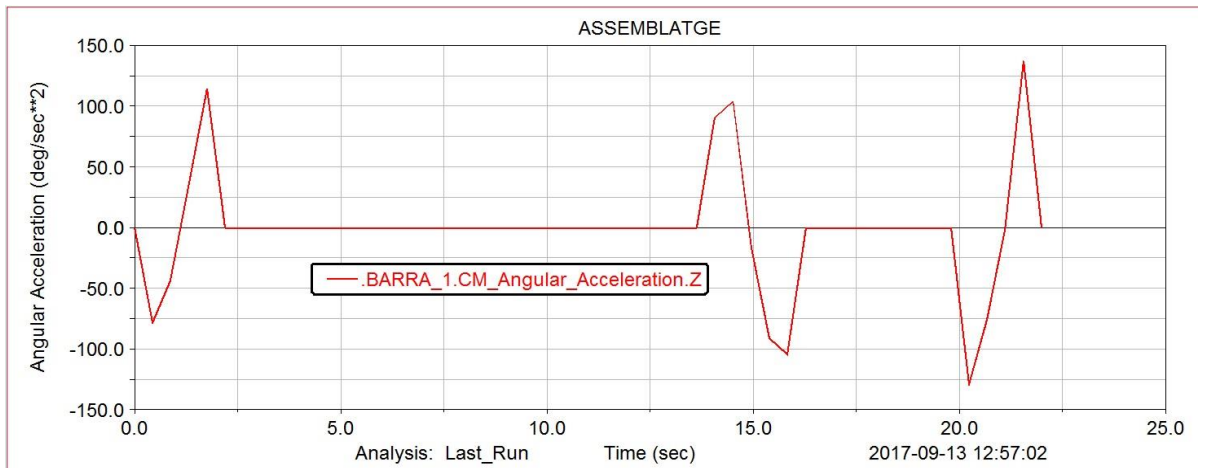


Imatge 47. Acceleració del centre de masses de la barra 1.



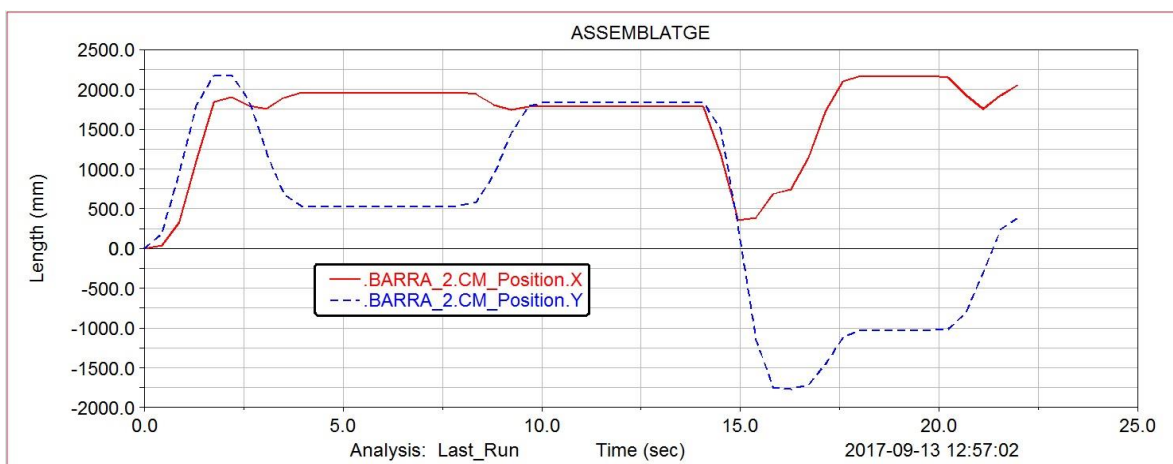
Imatge 48. Velocitat angular de la barra 1 en l'eix Z respecte del temps.



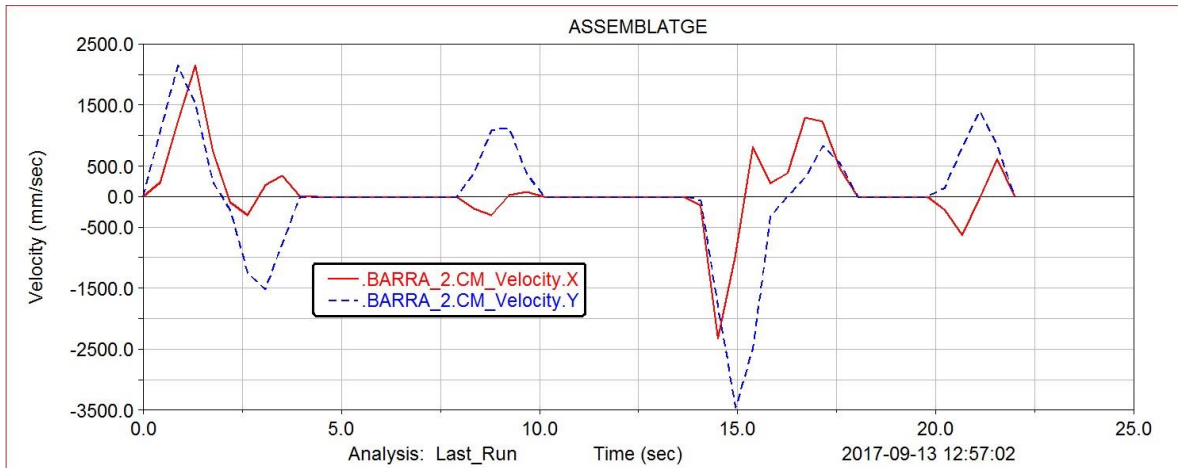


Imatge 49. Acceleració angular del centre de masses de la barra 1.

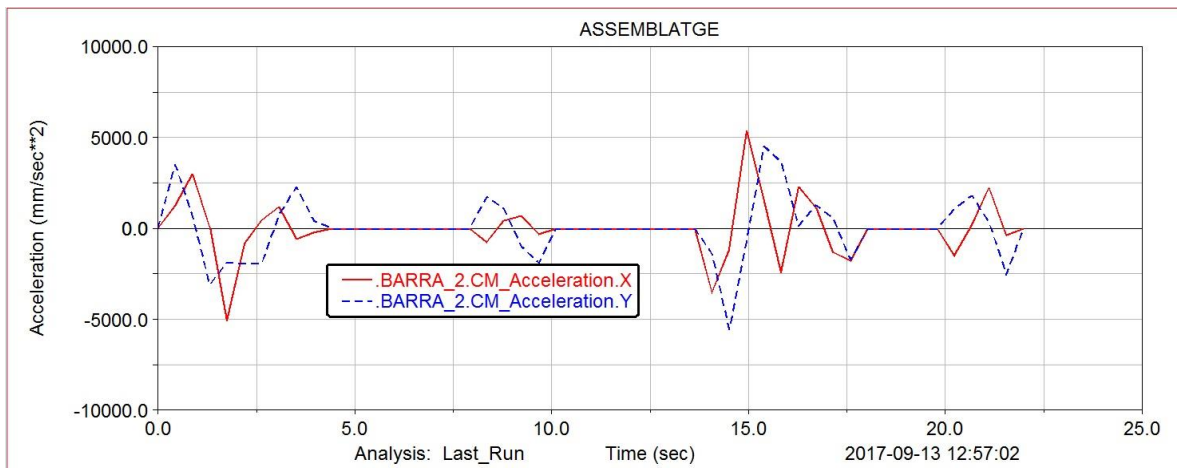
- Barra 2



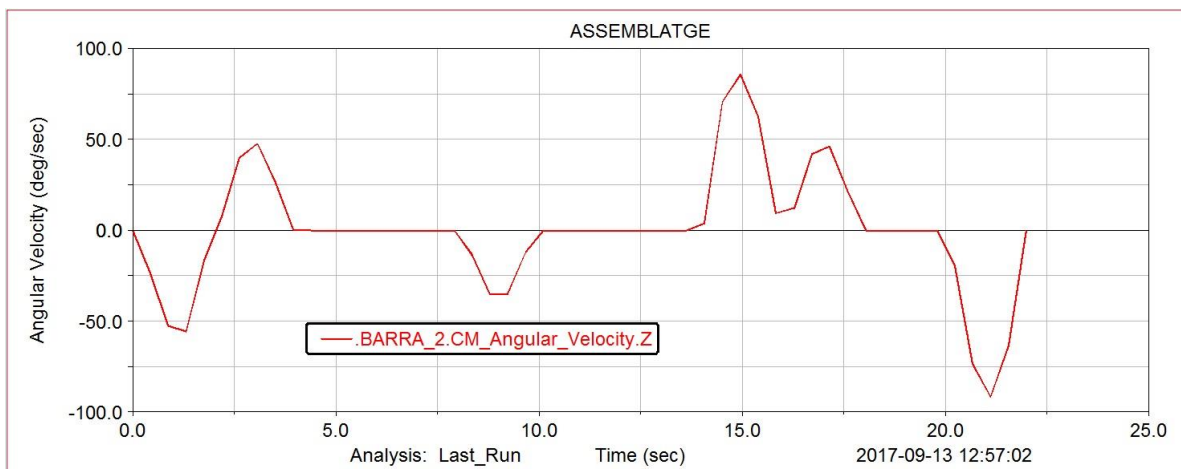
Imatge 50. Posició del centre de masses de la barra 2 respecte del temps.



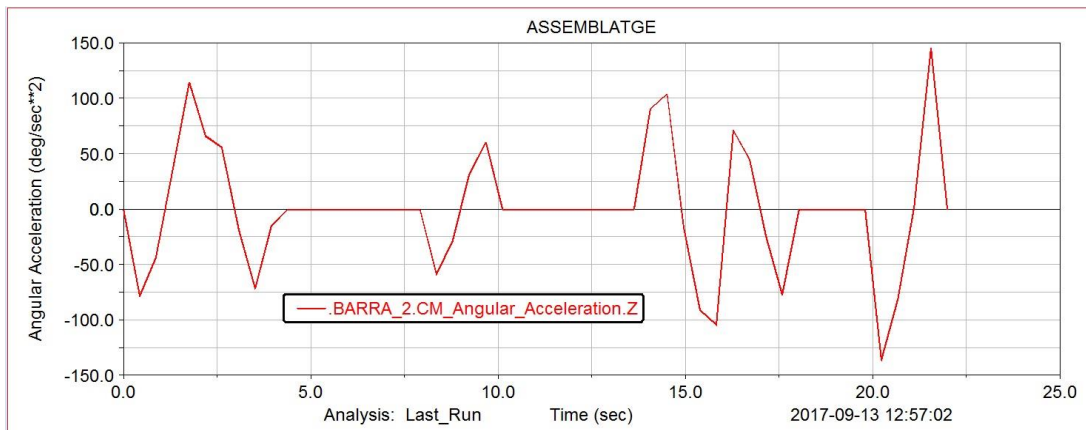
Imatge 51. Velocitat de la barra 2 respecte del temps en els eixos X i Y.



Imatge 52. Acceleració del centre de masses de la barra 2 respecte del temps.

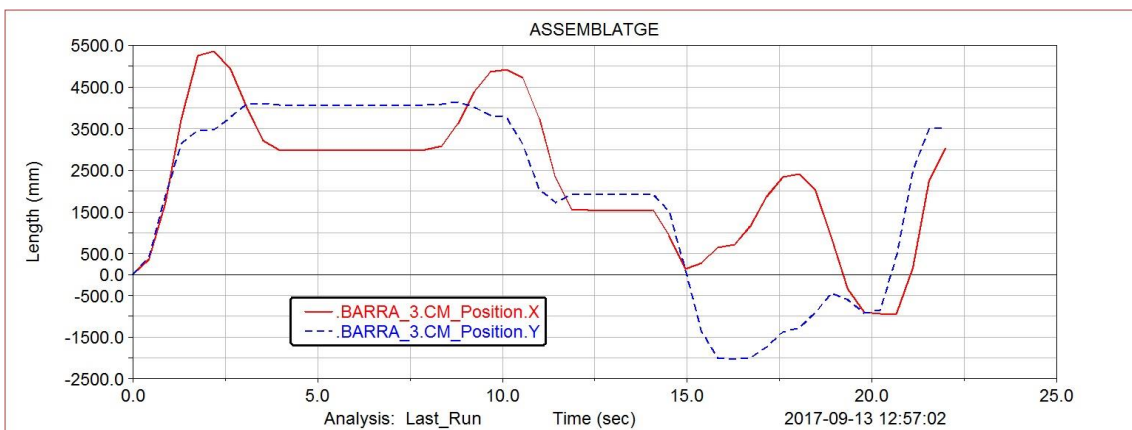


Imatge 53. Velocitat angular de la barra 2.

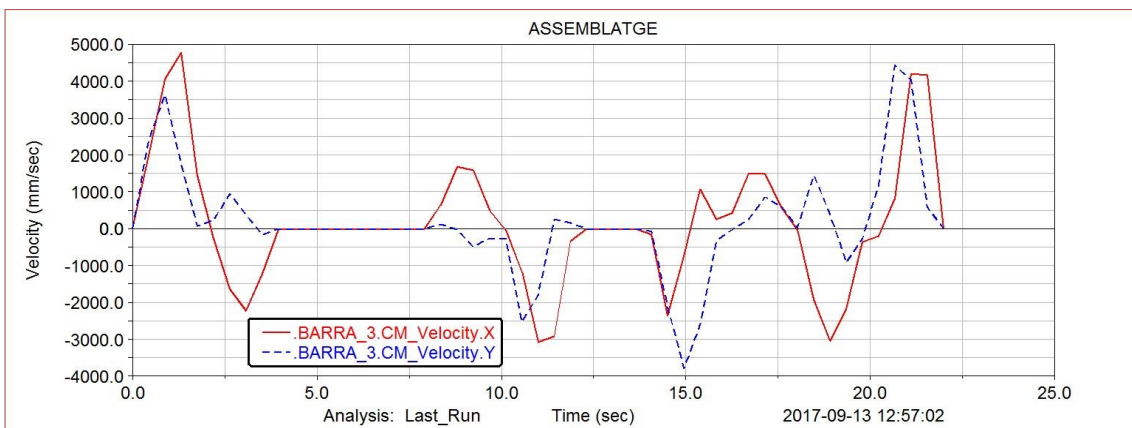


Imatge 54. Acceleració angular del centre de masses de la barra 2 respecte l'eix Z.

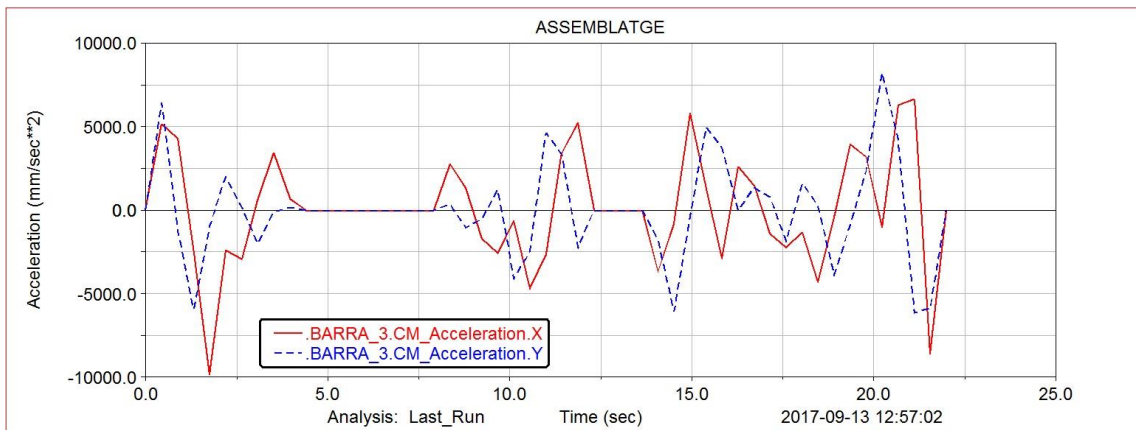
- Barra 3



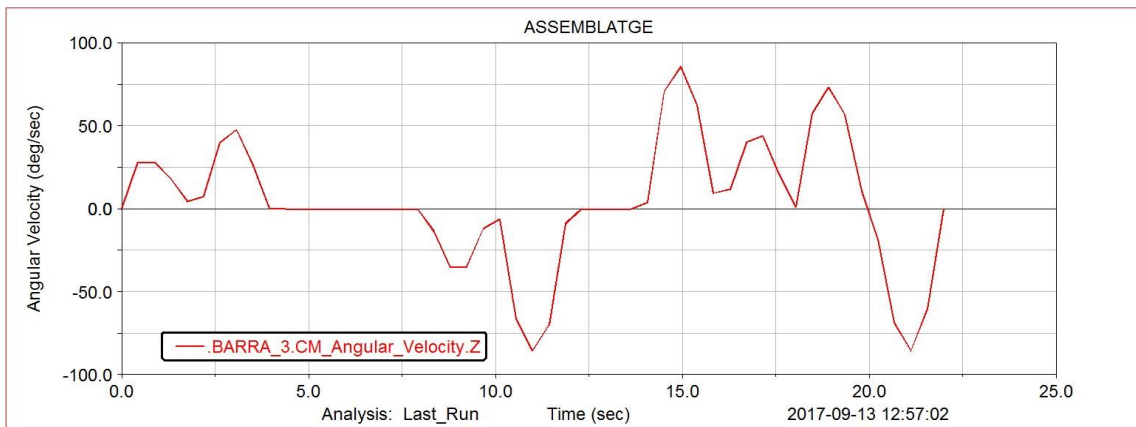
Imatge 55. Evolució de la posició de la barra 3.



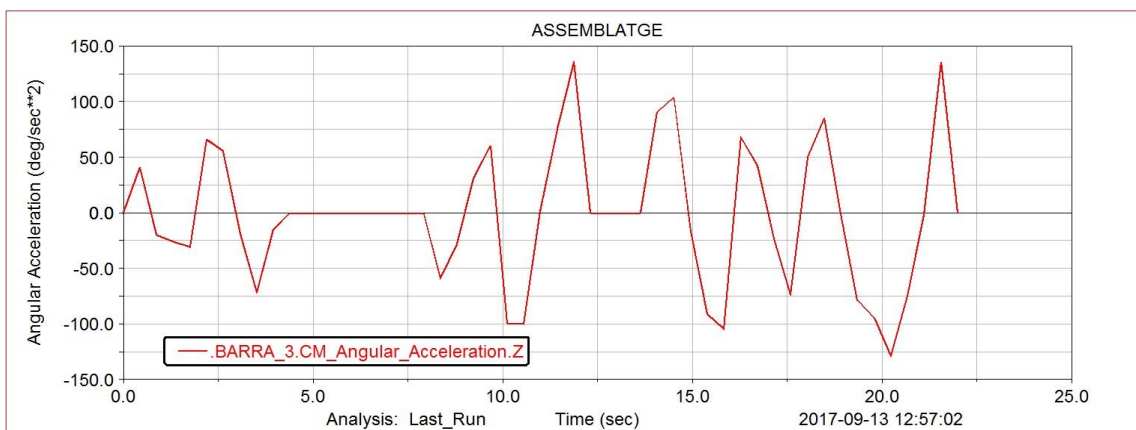
Imatge 56. Velocitat del centre de masses de la barra 3 respecte del temps.



Imatge 57. Evolució de l'acceleració del centre de masses de la barra 3.

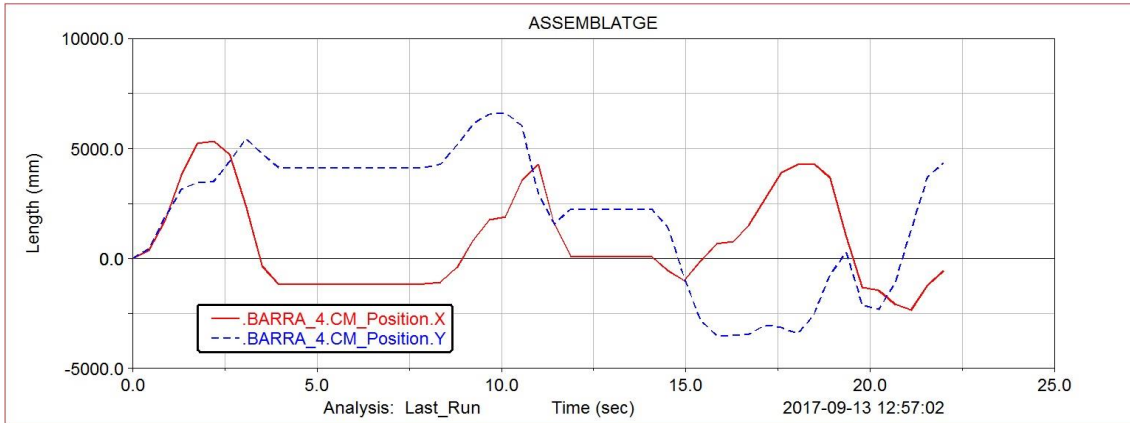


Imatge 58. Velocitat angular de la barra 3 en l'eix Z.

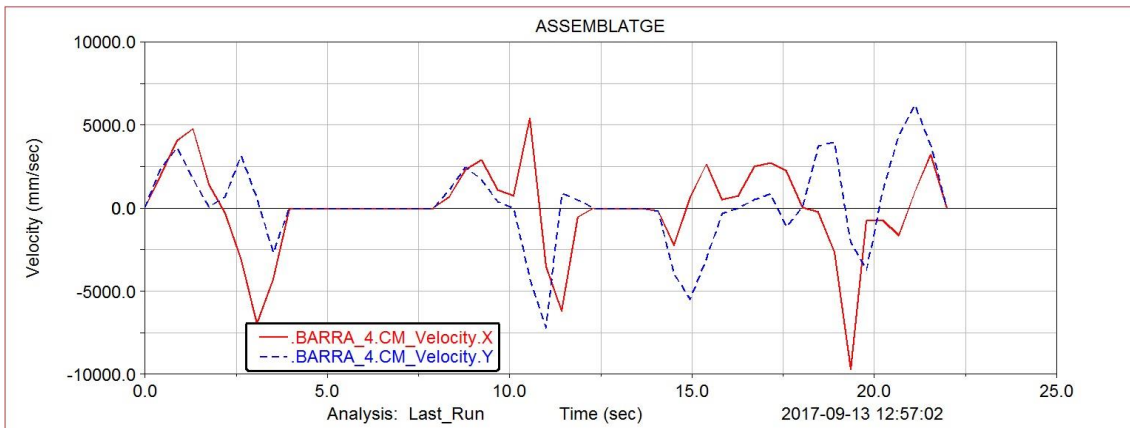


Imatge 59. Gràfica de l'evolució de l'acceleració angular del centre de masses de la barra 3.

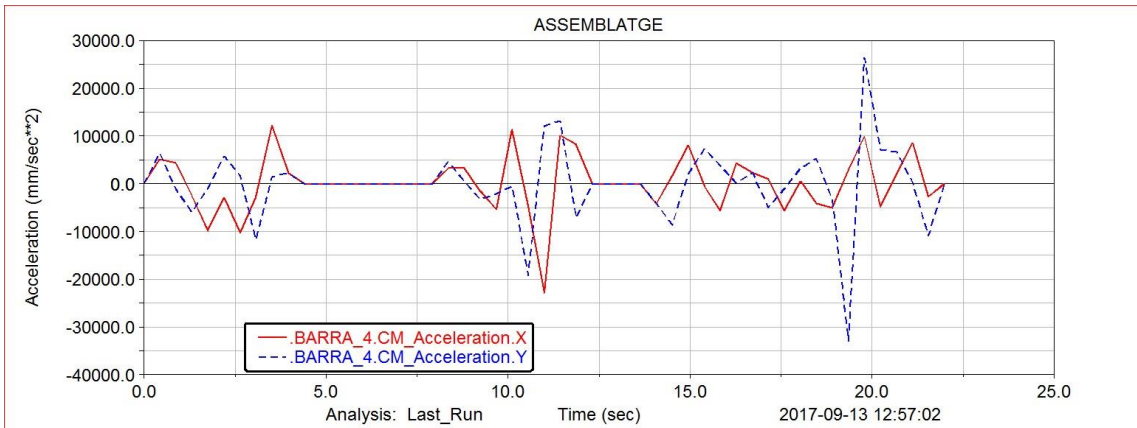
- Barra 4



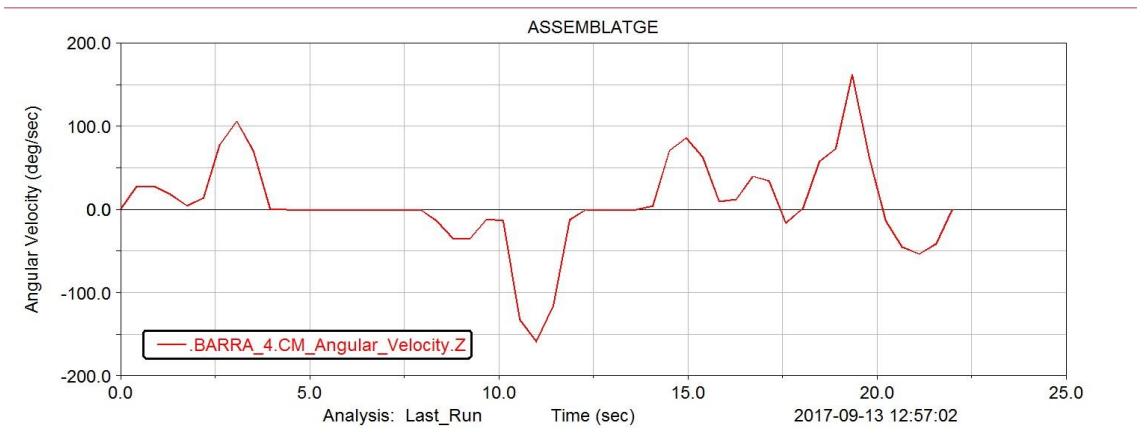
Imatge 60. Representació de la evolució del centre de masses de la barra 4.



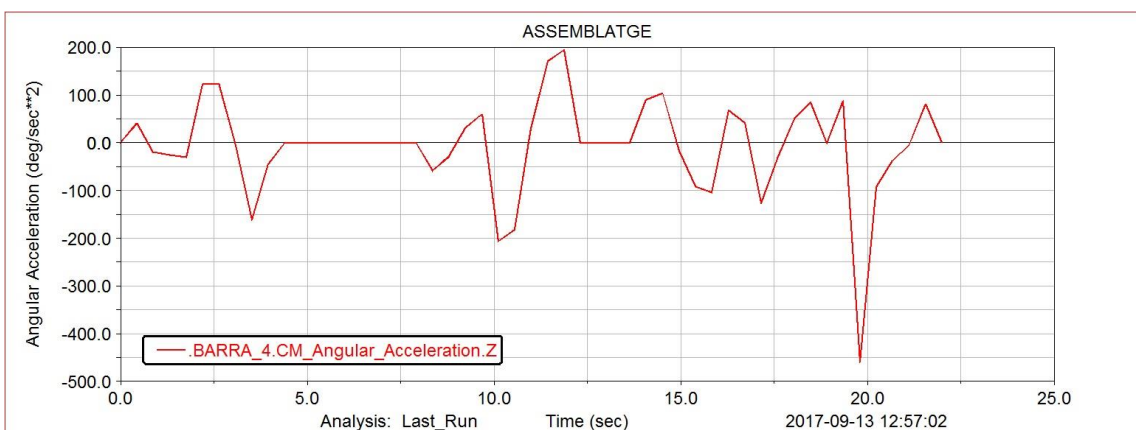
Imatge 61. Gràfica de l'evolució de la velocitat lineal del centre de masses de la barra 4.



Imatge 62. Acceleració de la barra 4.

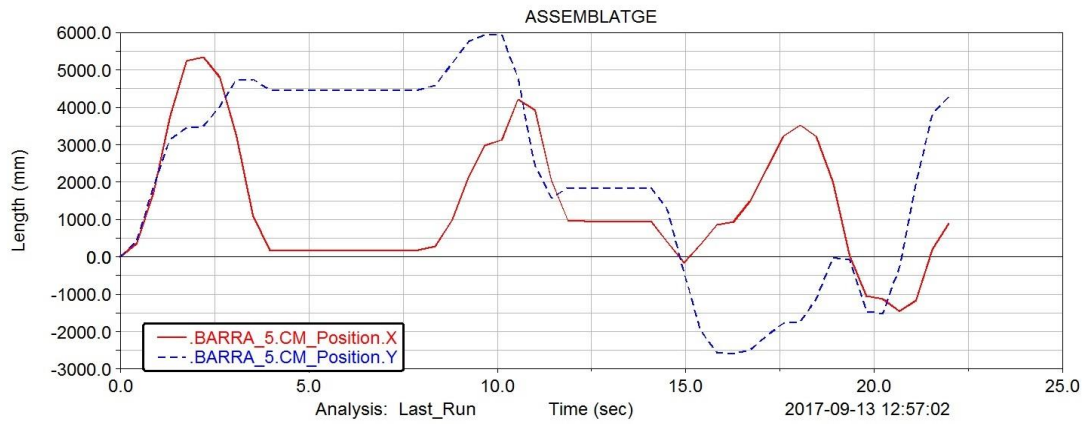


Imatge 63. Representació de la velocitat angular del centre de masses de la barra 4.

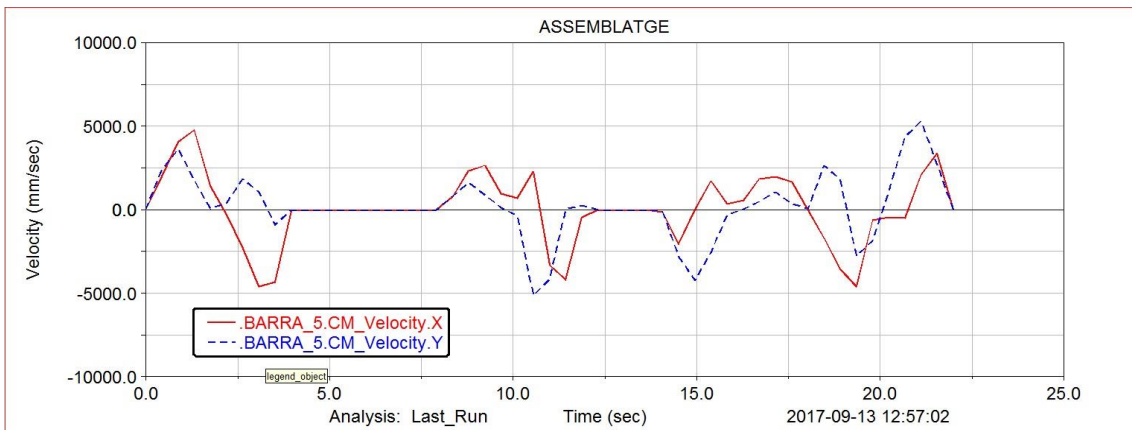


Imatge 64. Gràfica de l'acceleració angular de la barra 4.

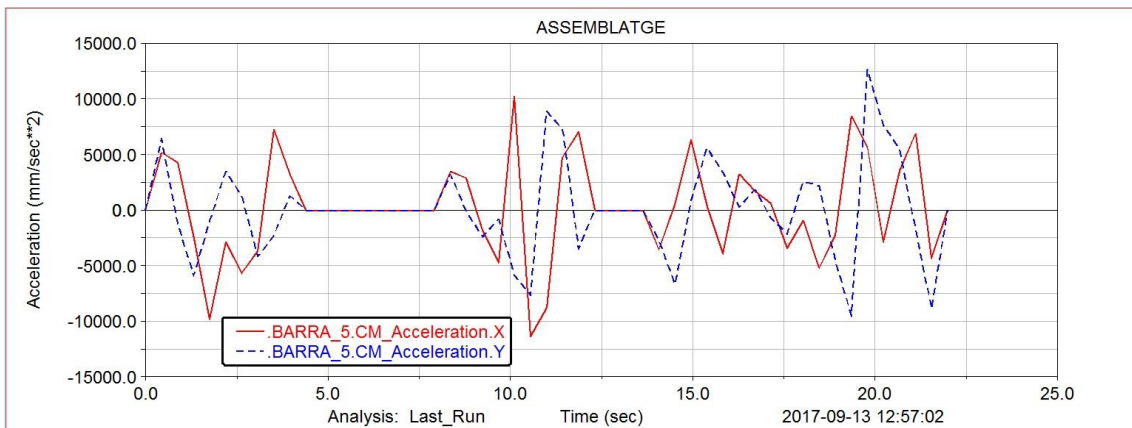
- Barra 5



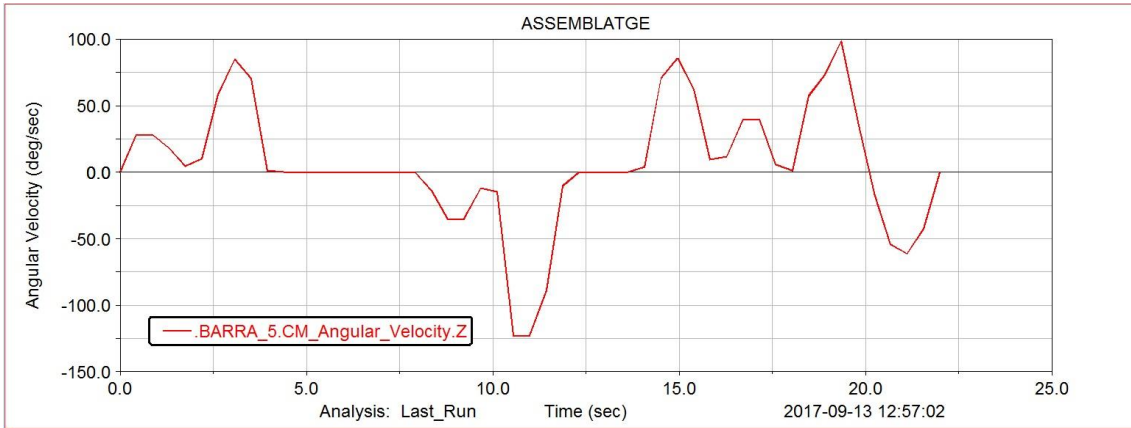
Imatge 65. Evolució de la posició del centre de masses de la barra 5.



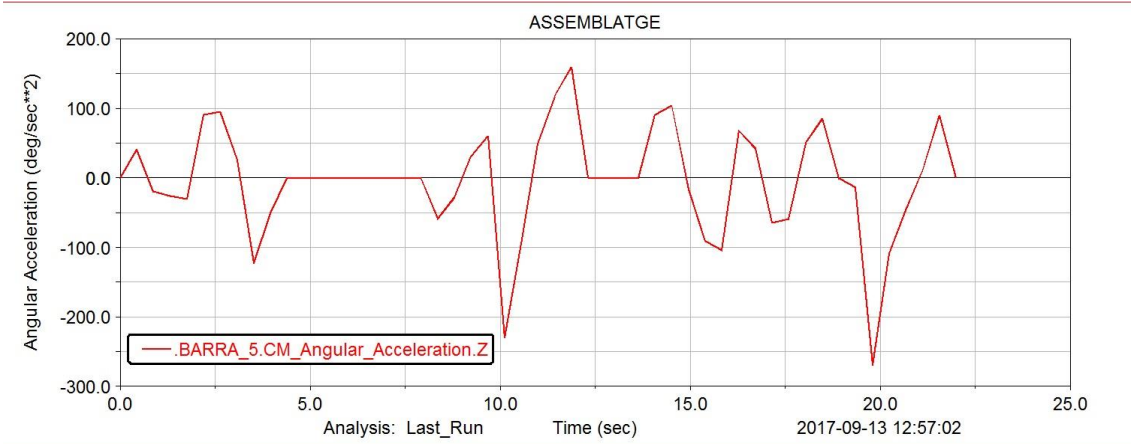
Imatge 66. Gràfica de la velocitat lineal de la barra 4.



Imatge 67. Acceleració de la barra 5 respecte del temps.



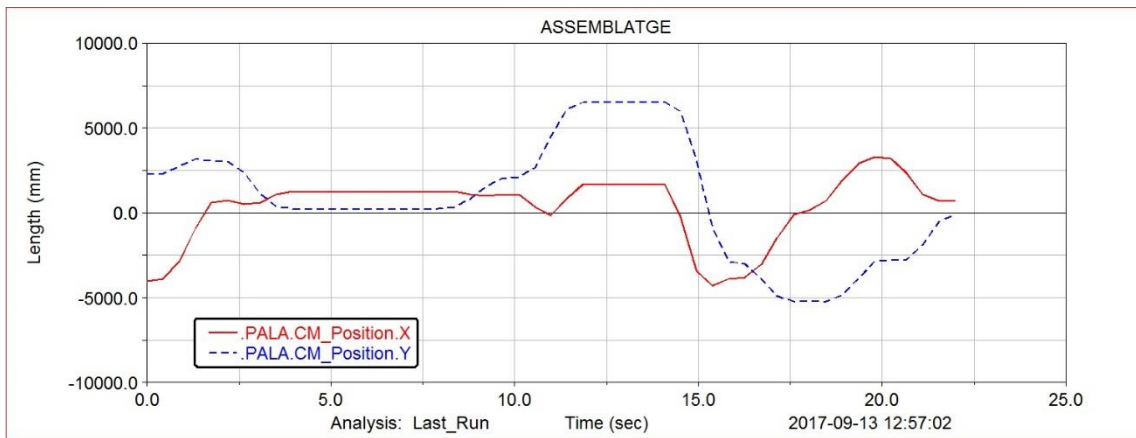
Imatge 68. Velocitat angular en l'eix Z de la barra 5.



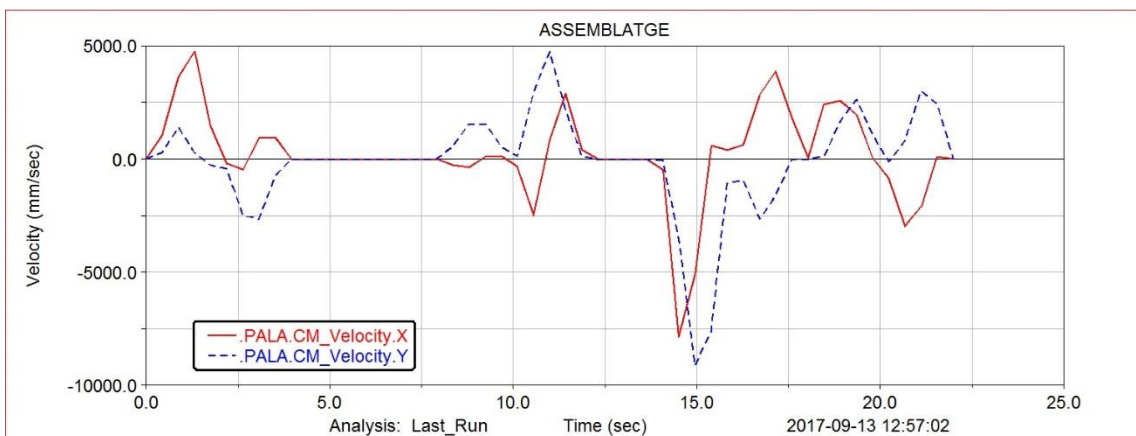
Imatge 69. Gràfica de l'acceleració angular de la barra 5.



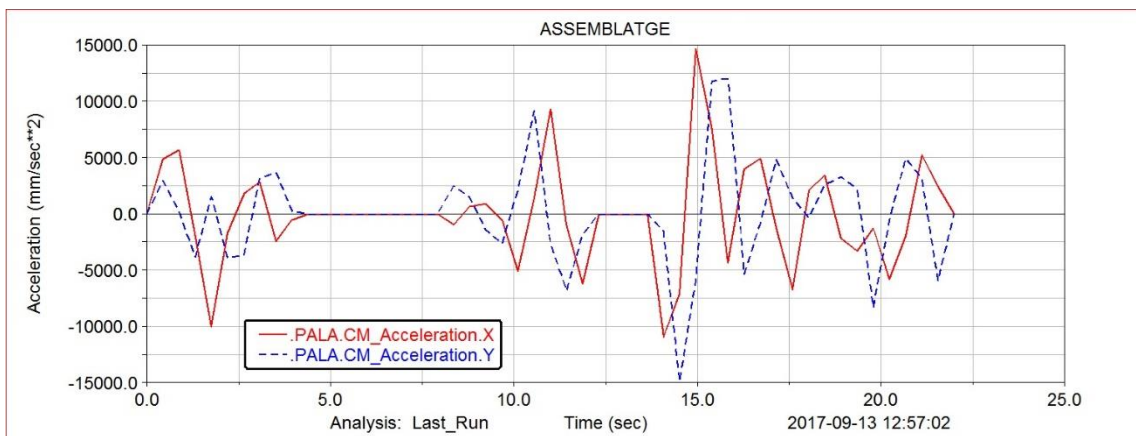
- Pala



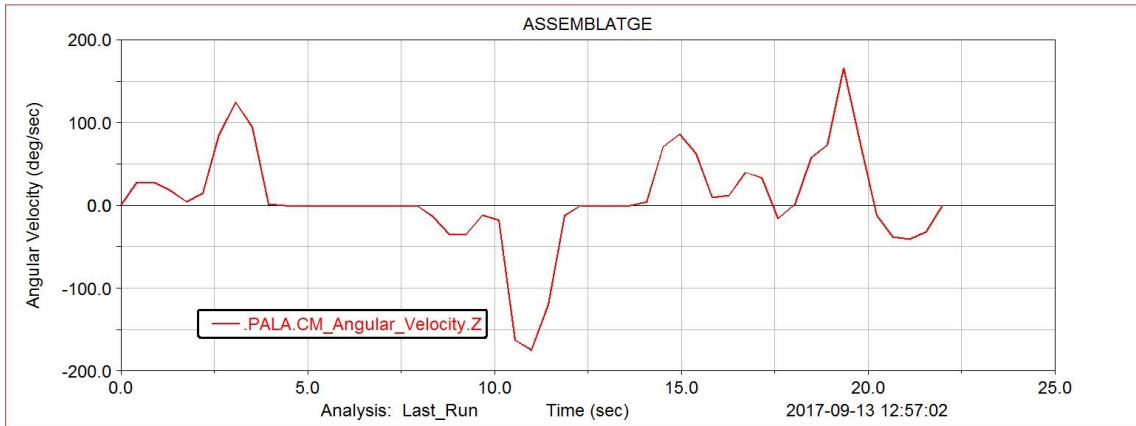
Imatge 70. Posició de la pala respecte del temps.



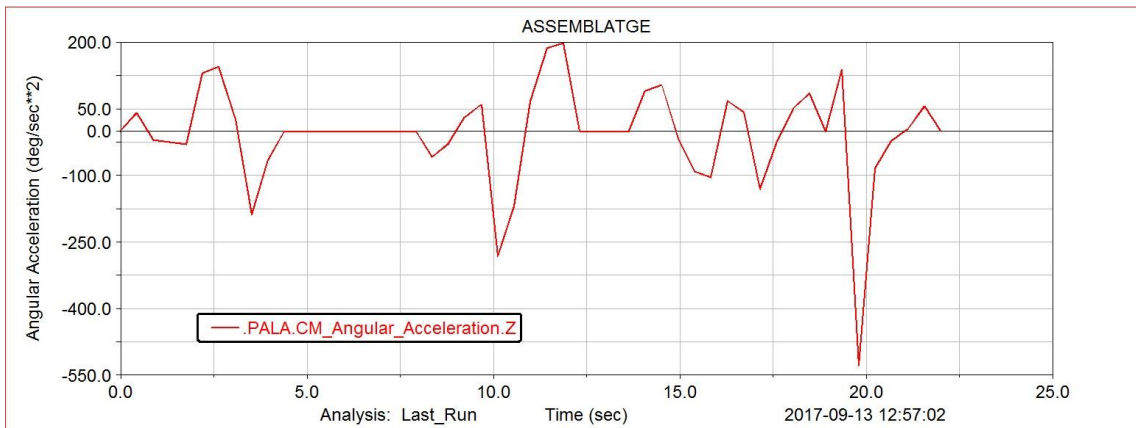
Imatge 71. Velocitat del centre de masses de la pala.



Imatge 72. Evolució de l'acceleració lineal de la pala respecte del temps.



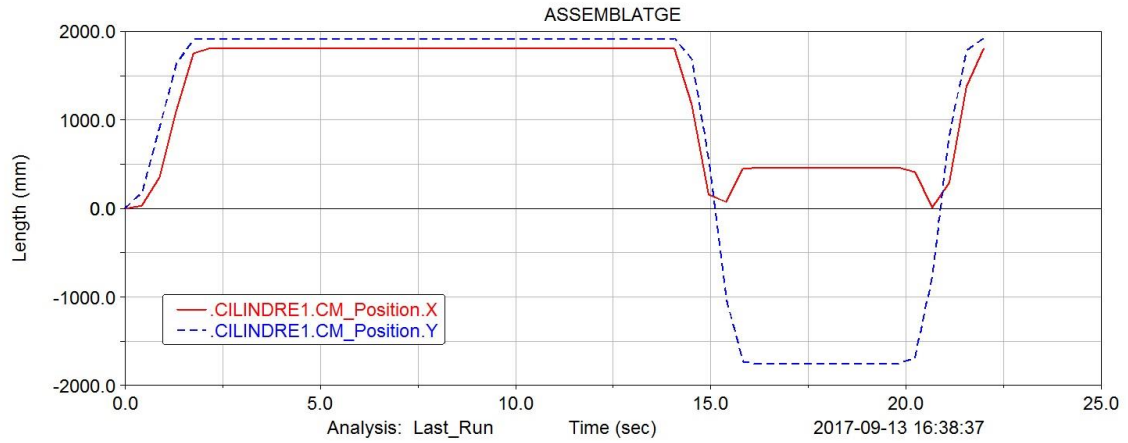
Imatge 73. Velocitat angular del centre de masses de la pala.



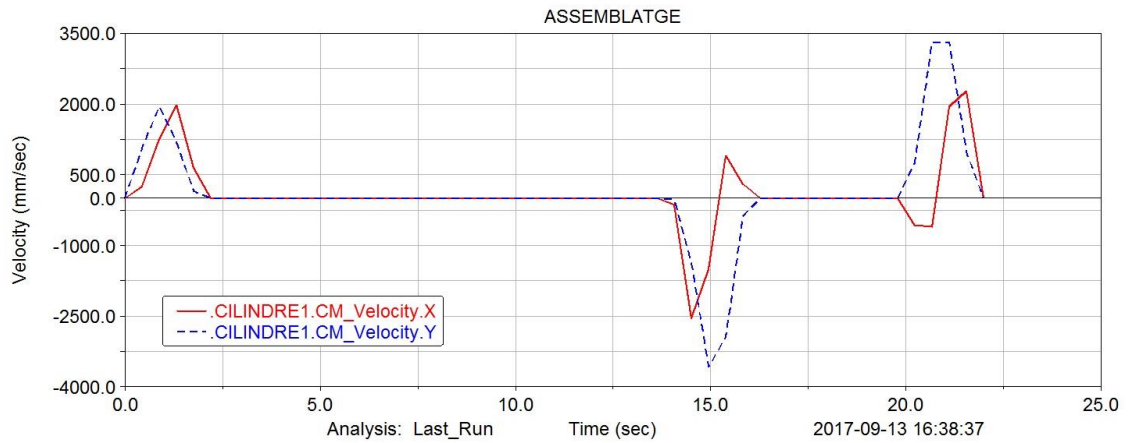
Imatge 74. Gràfica de l'acceleració angular de la pala.

Les posicions, velocitats i acceleracions dels cilindres els representarem d'igual forma que les barres.

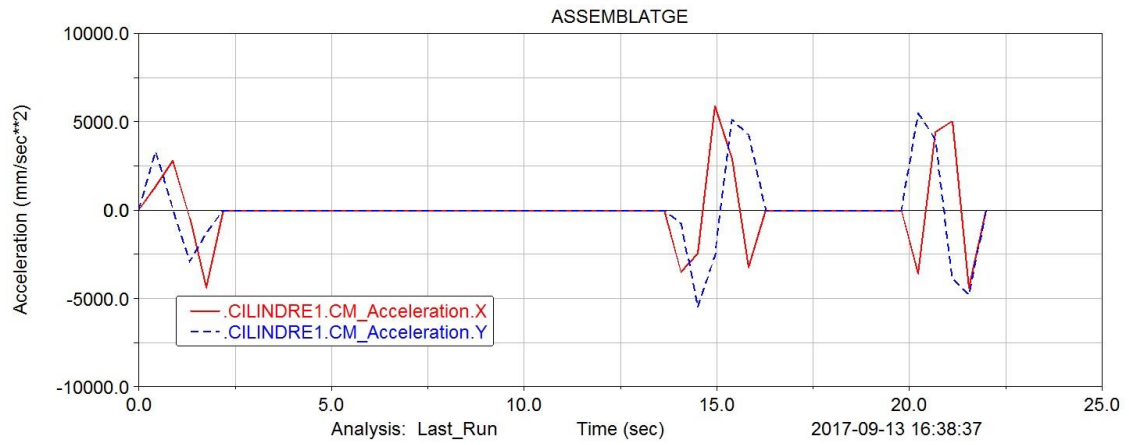
- Cilindre 1



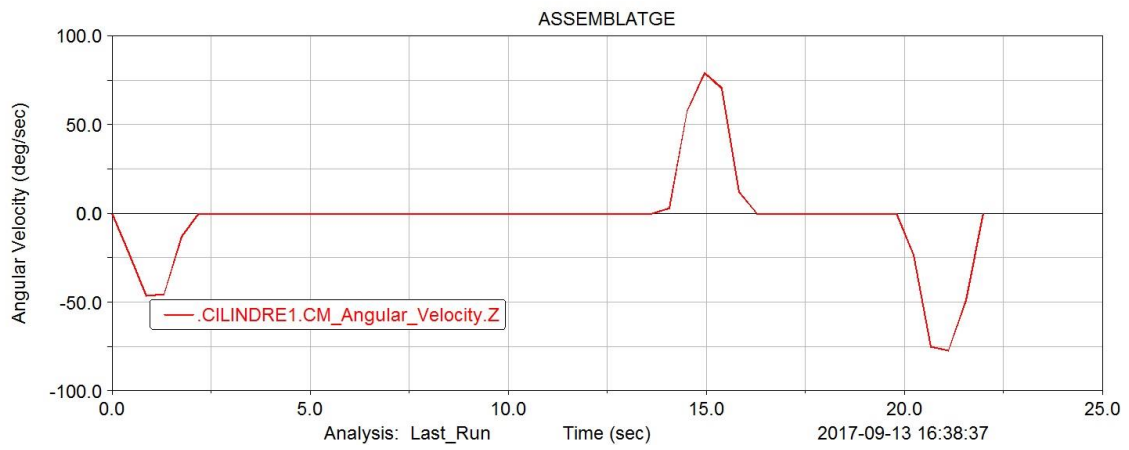
Imatge 75. Representació de la posició del centre de masses del primer cilindre.



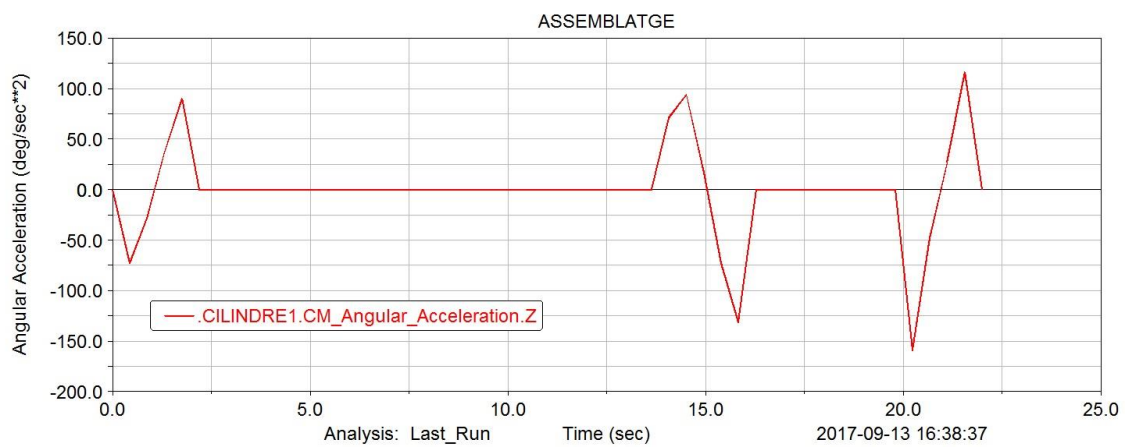
Imatge 76. Gràfica de la velocitat lineal del cilindre 1.



Imatge 77. Acceleració del centre de masses del cilindre 1.

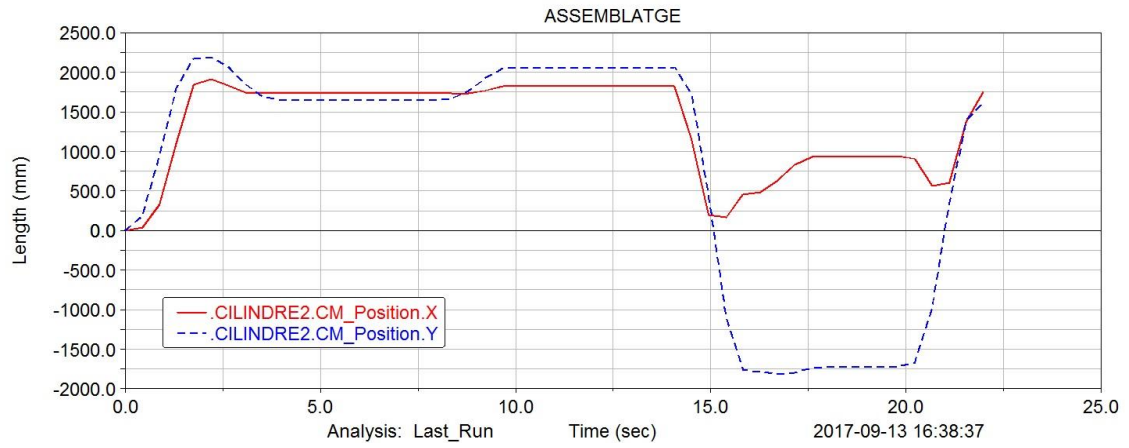


Imatge 78. Representació de la velocitat angular en l'eix Z.

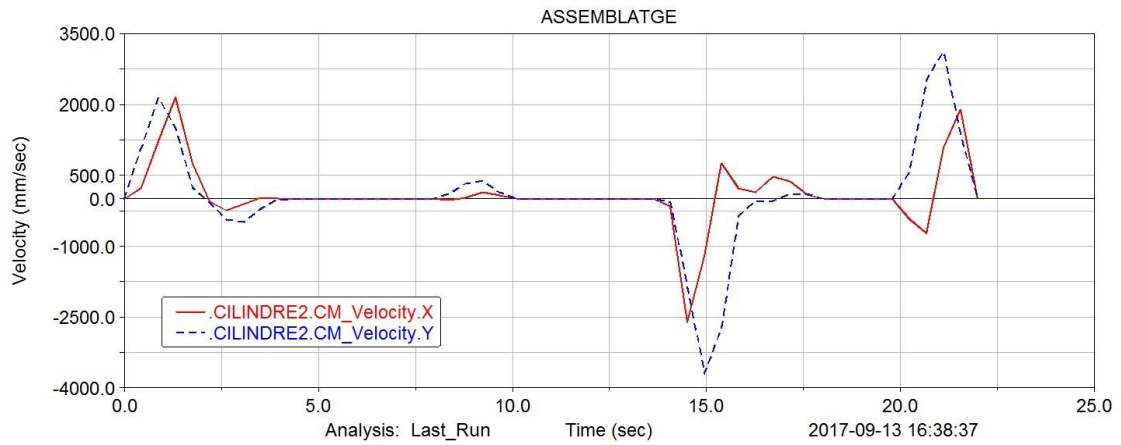


Imatge 79. Gràfica de l'acceleració angular del cilindre 1.

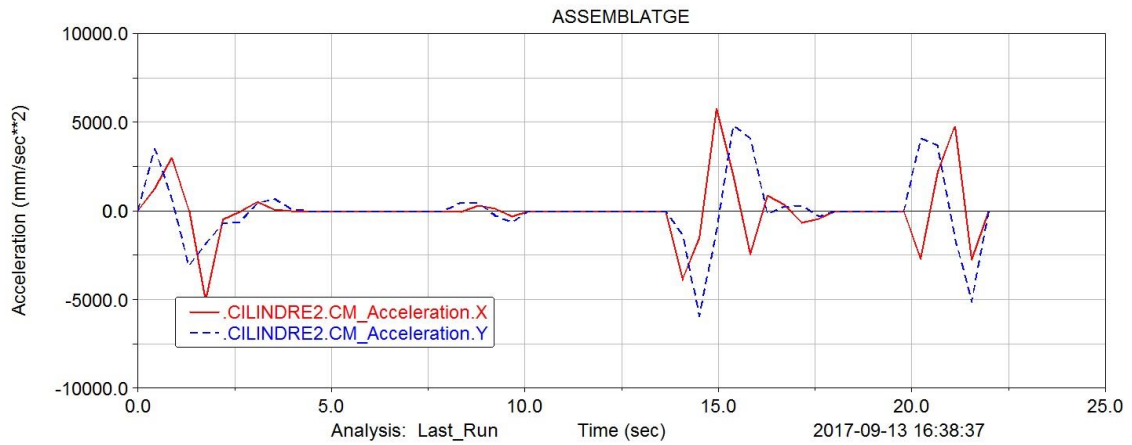
- Cilindre 2



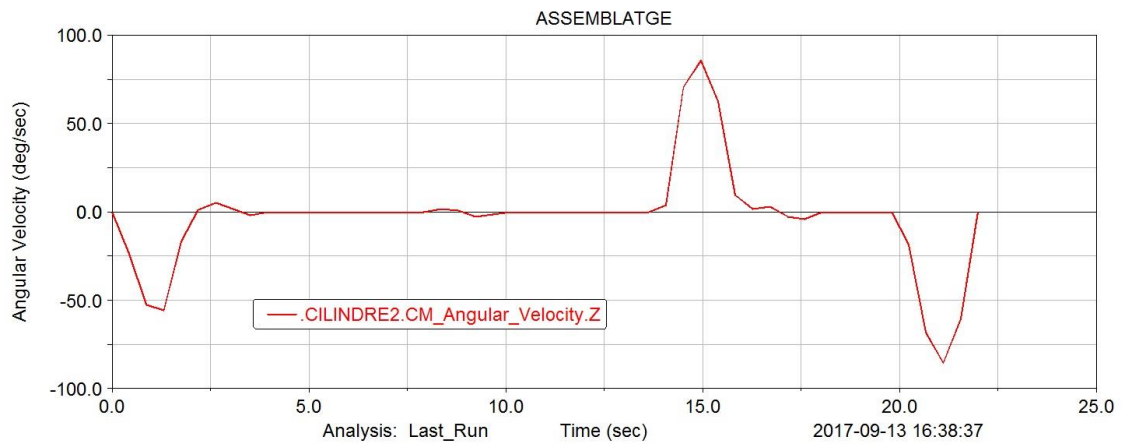
Imatge 80. Posició del centre de masses del cilindre 2.



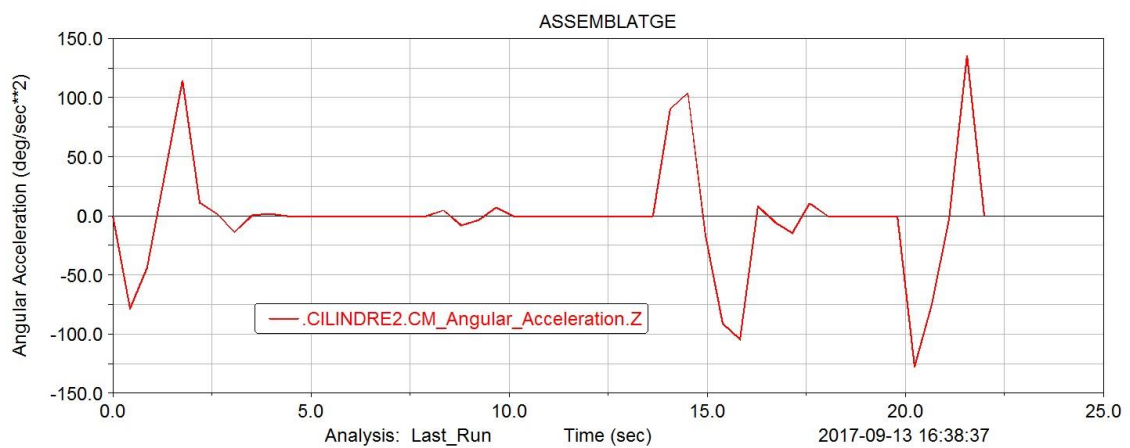
Imatge 81. Gràfica de la velocitat del cilindre 2.



Imatge 82. Acceleració lineal del centre de masses del cilindre.

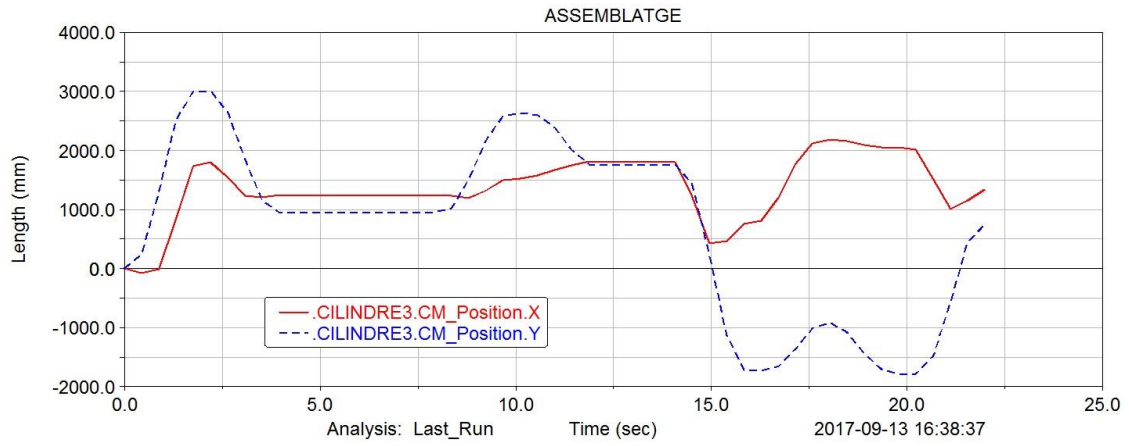


Imatge 83. Velocitat angular del cilindre 2.

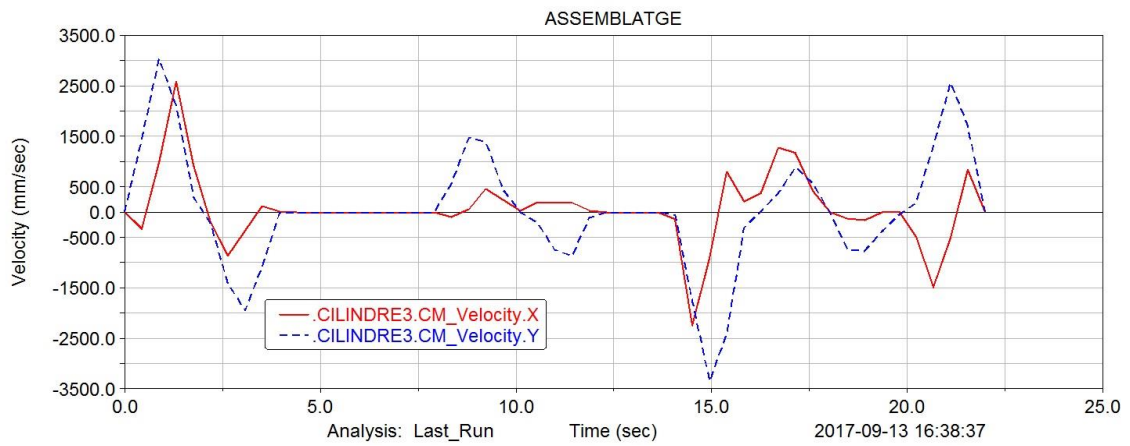


Imatge 84. Representació de l'acceleració angular.

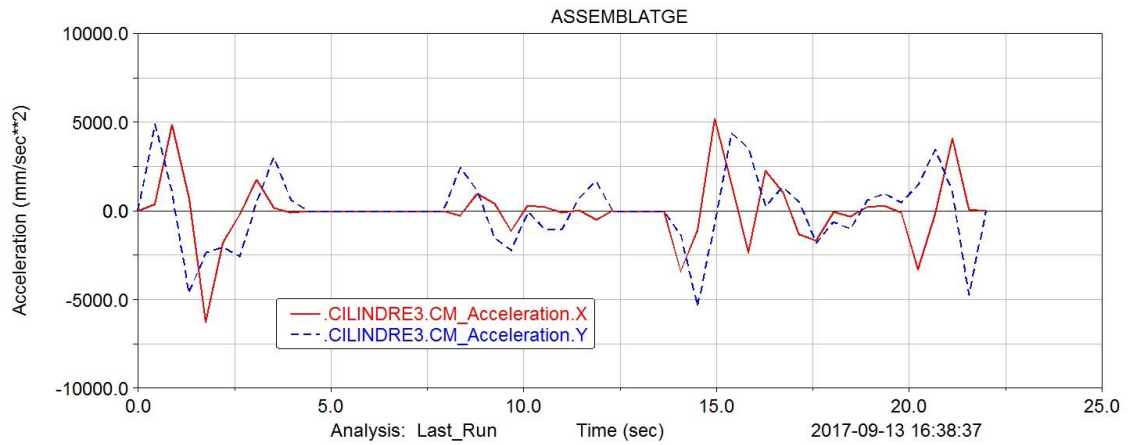
- Cilindre 3



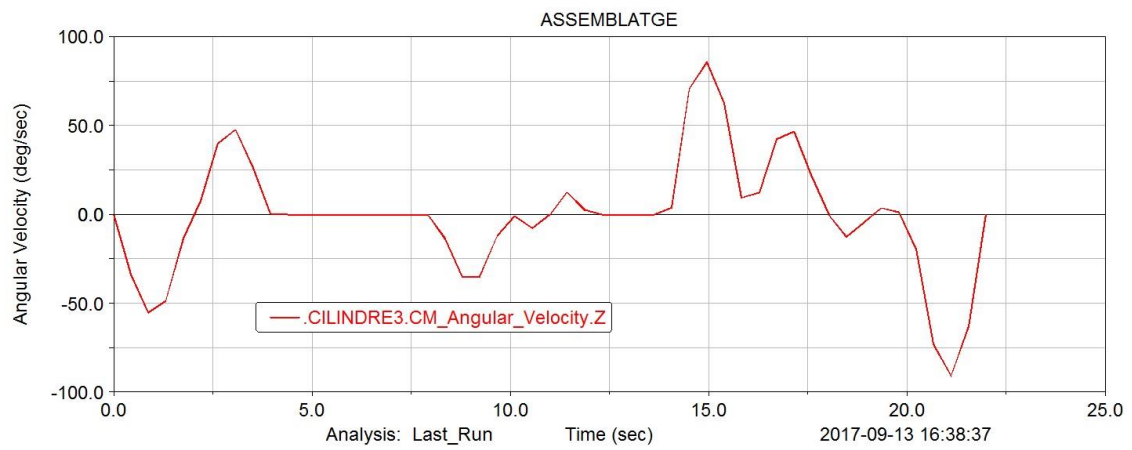
Imatge 85. Posició CM cilindre 3.



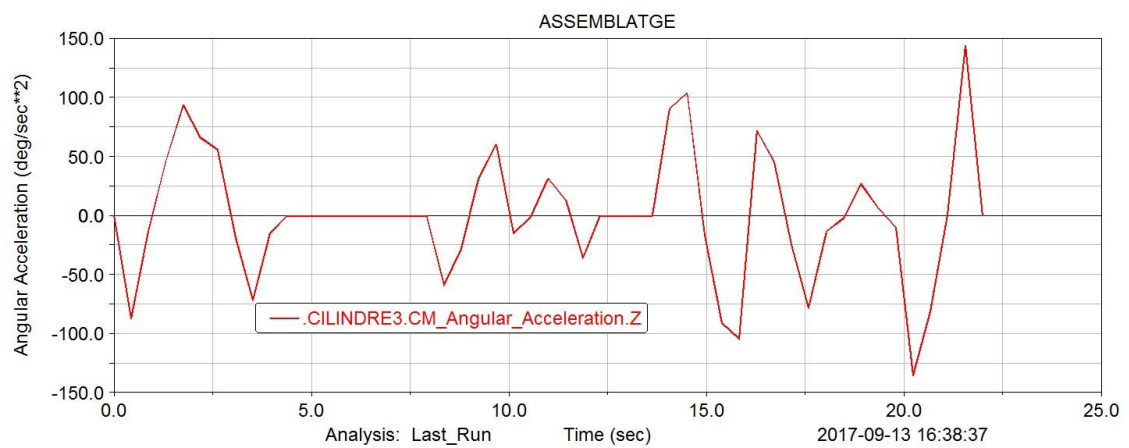
Imatge 86. Gràfica de la velocitat lineal del cilindre 3.



Imatge 87. Acceleració del cilindre 3.



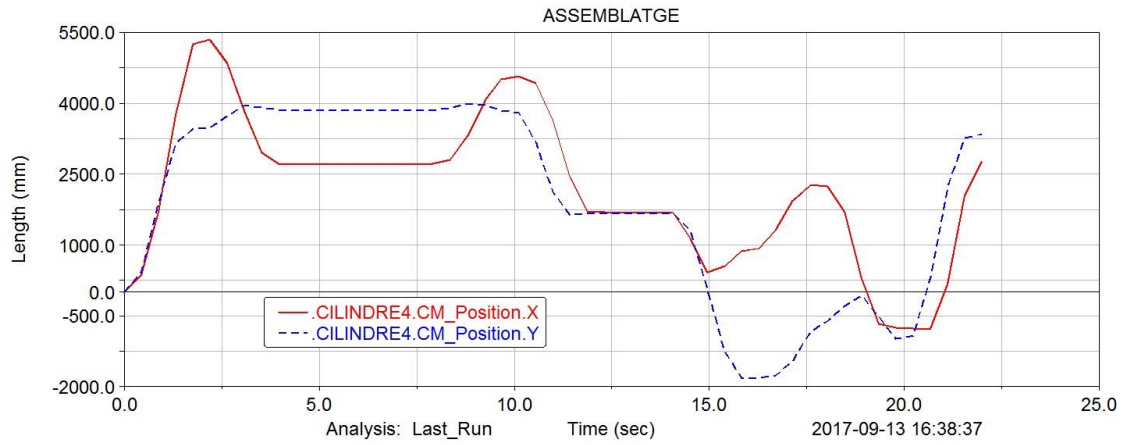
Imatge 88. Gràfica de la velocitat angular del pistó del cilindre.



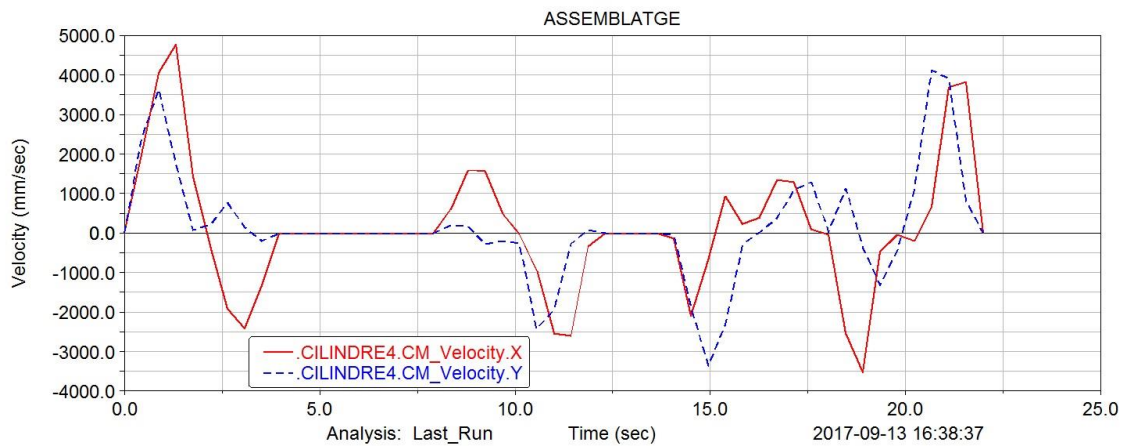
Imatge 89. Acceleració angular en l'eix Z.



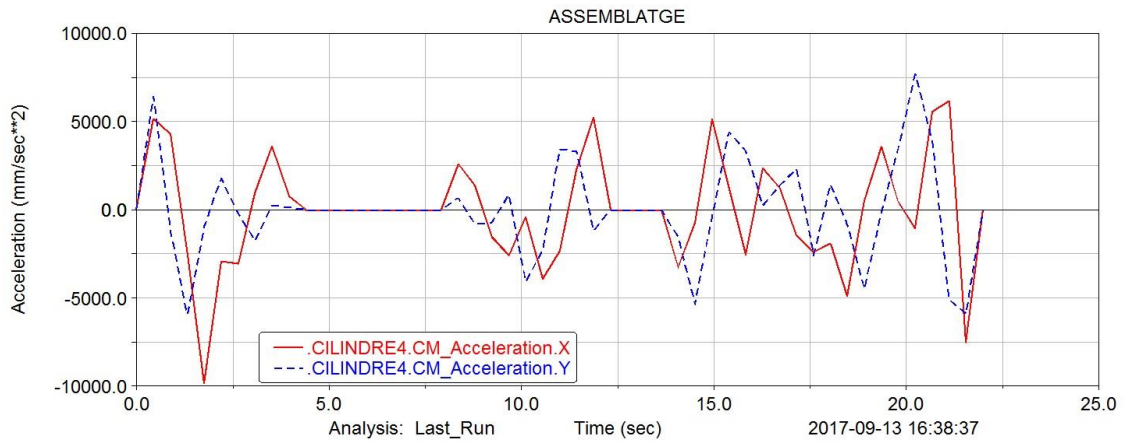
- Cilindre 4



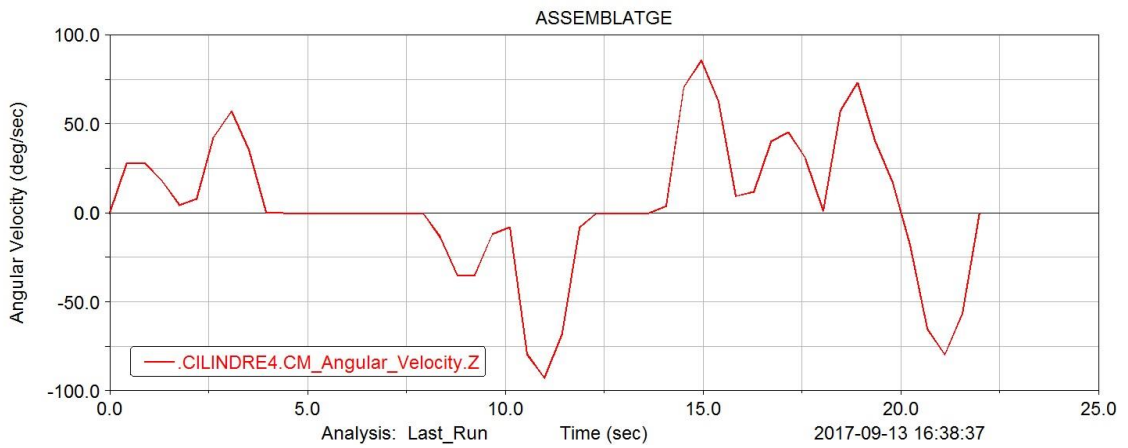
Imatge 90. Posició del CM en el cilindre 4.



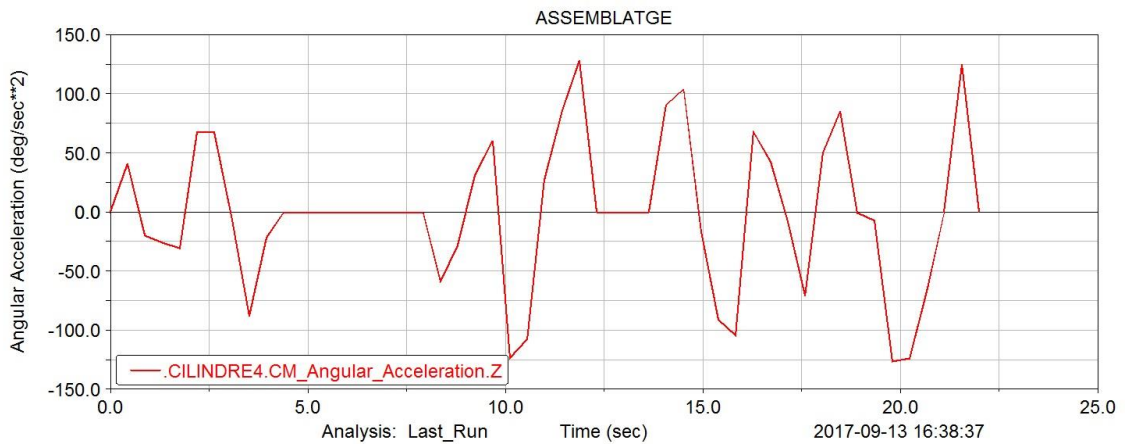
Imatge 91. Gràfica de la velocitat del CM en els eixos X i Y.



Imatge 92. Representació de l'acceleració del cilindre 4



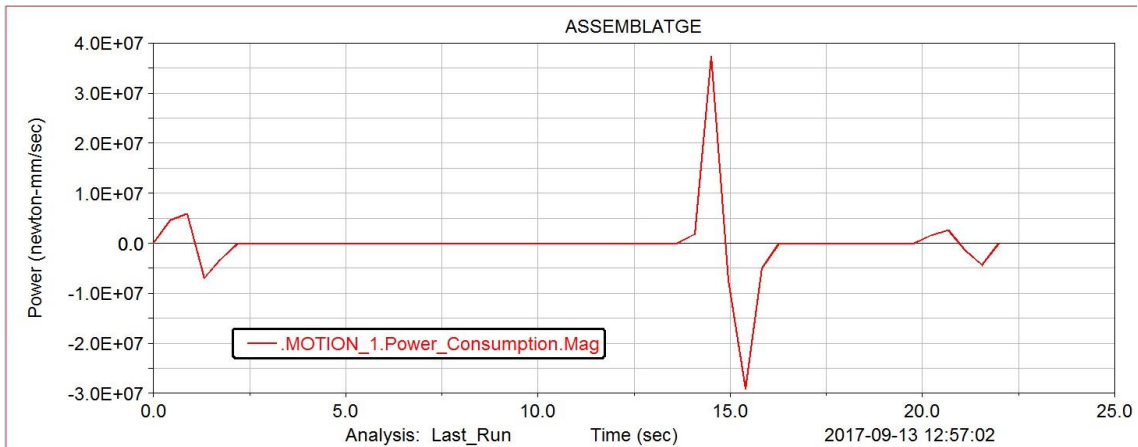
Imatge 93. Gràfica de la velocitat angular del CM del cilindre.



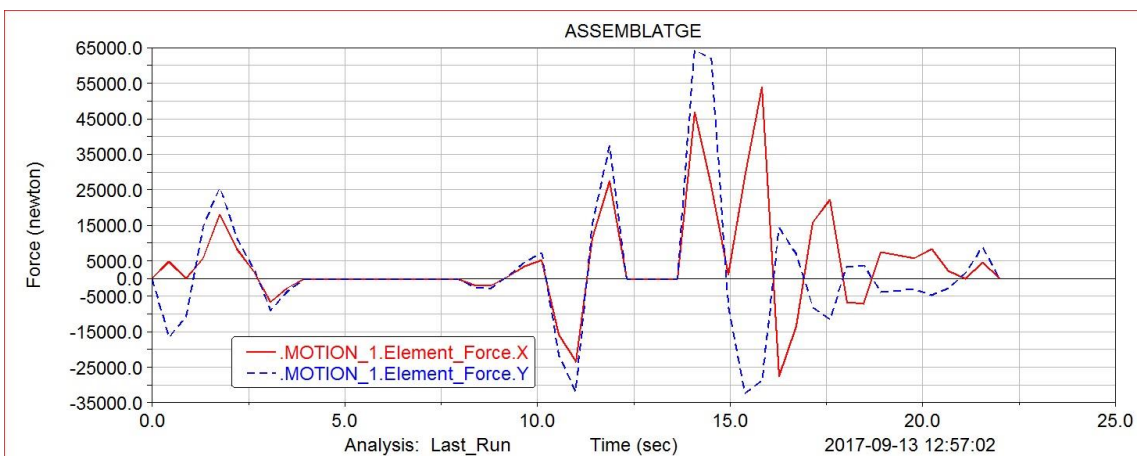
Imatge 94. Representació acceleració angular en l'eix Z.

També es poden representar gràficament els moviments imposats al sistema i els esforços a que estan sotmesos els parells de restricció. Em escollit les gràfiques més representatives per donar una visió global de l'abast de l'estudi.

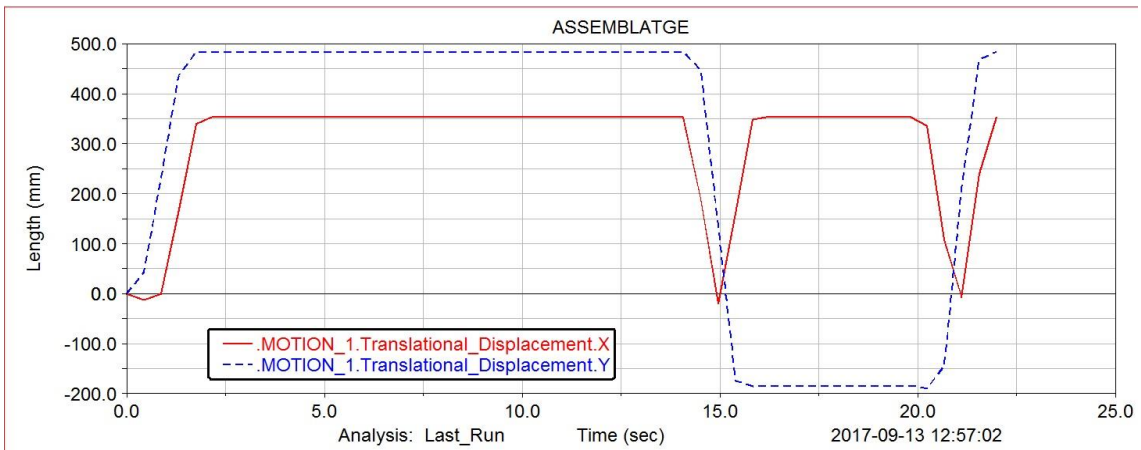
- **Moviments**



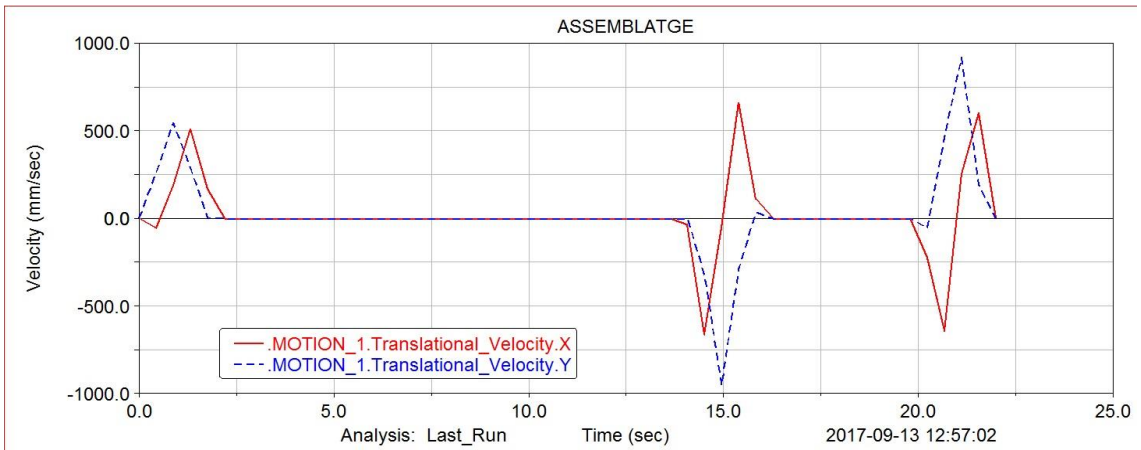
Imatge 95. Consum del moviments imposats a la màquina del cilindre 1.



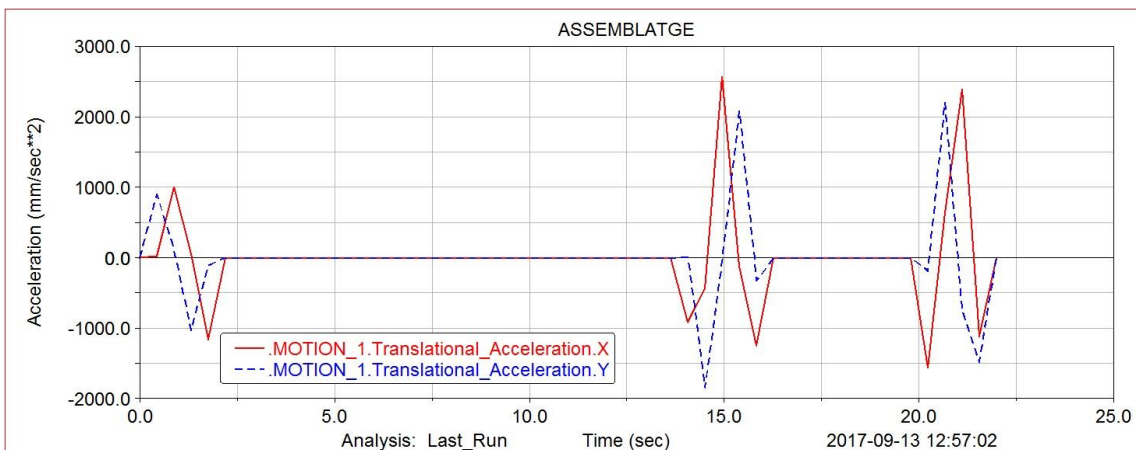
Imatge 96. Força que genera el moviment 1.



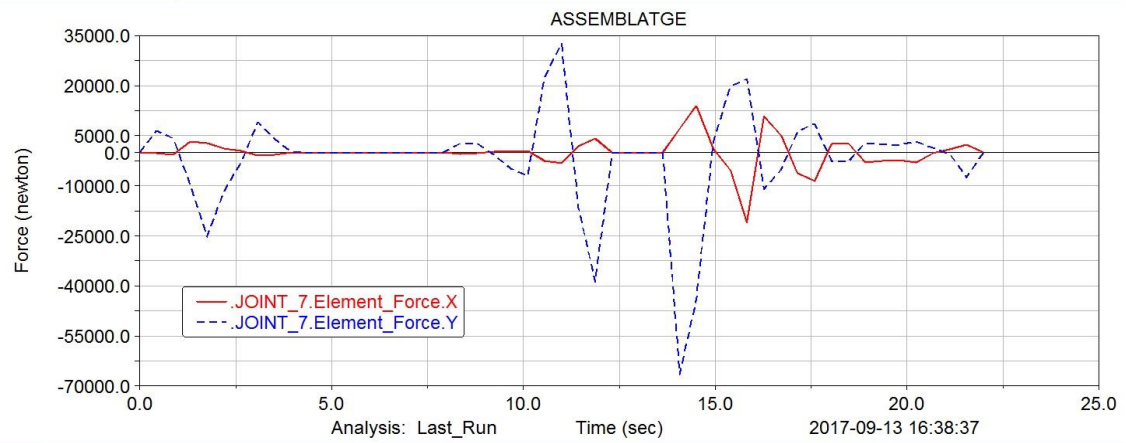
Imatge 97. Gràfica del desplaçament de translació del moviment 1.



Imatge 98. Representació de la velocitat de translació.



Imatge 99. Gràfica de l'acceleració de translació del moviment 1 als eixos X i Y.



Model	Filter	Object	Characteristic	Component	Surf
ASSEMBLATGE	body	+ CILINDRE4	Element_Force	X	
	force	+ PAIA	Element_Torque	Y	
	constraint	+ JOINT_1	Translational_Displacement	Z	
		+ JOINT_2	Rotational_Angles	Mag	
		+ JOINT_4	Translational_Velocity		
		+ JOINT_6	Translational_Acceleration		
		+ JOINT_6	Angular_Velocity		
		+ JOINT_7	Angular_Acceleration		
		+ JOINT_8			
		+ JOINT_9			
		+ JOINT_10			
		+ JOINT_11			
		+ JOINT_12			
		+ JOINT_13			
		+ JOINT_14			
		+ JOINT_15			
		+ JOINT_16			
		+ JOINT_17			

Source: Objects

Filter: \*

Surf: Add Curves, Add Curves To Current Plot, Clear Plot

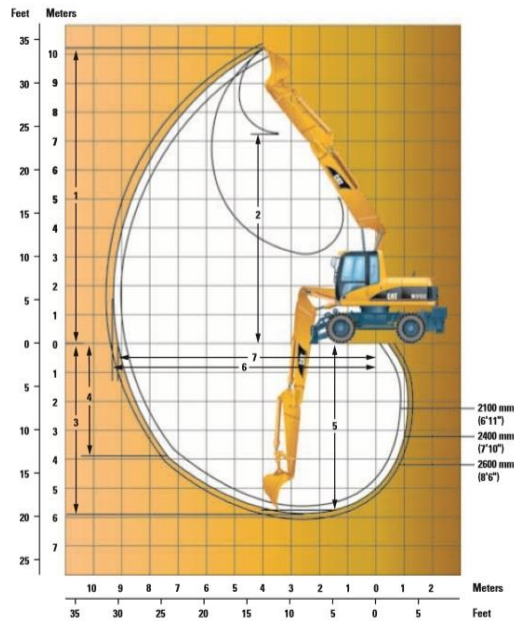
Independent Axis: Time, Data

Imatge 100. Visualització del post-processador. Forces a les que està sotmès el parell número 7 del mecanisme als eixos X i Y.

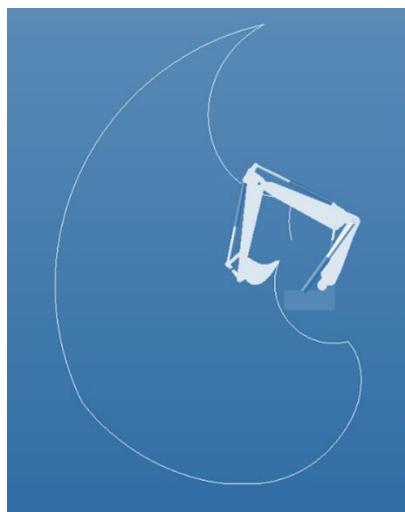
## 7.2. Conclusions

Per a donar validesa al model simulat, ens fixarem en la corba d'operació que ens proporciona el fabricant de la màquina. Si els moviments són correctes, el programa 'Adams View' és capaç d'obtenir trajectòries de molts punts.

En aquest cas es facilita l'amplitud que pot assolir la màquina, aquesta informació està extreta directament del catàleg de la M315C. Quan s'haja simulat el model i la corba que descriu el punt més extrem de la pala es parega a la informació que hi ha al catàleg, direm que el model és correcte.



Imatge 101. Amplitud de la pala, imatge extreta del manual de la M315C.



Imatge 102. Amplitud de la pala, imatge extreta del programa 'Adams View'.

Com es pot veure a les imatges anteriors, la trajectòria descrita per la pala al model informàtic s'assembla molt a la informació que dona el fabricant. Després d'haver realitzat aquesta comparació podem dir que el model simulat es vàlid.

Aquest treball està realitzat bàsicament per a poder ser utilitzat en estudis acadèmics per a assignatures de modelat informàtic. D'altra banda, el model es podria introduir en programes per a anàlisi d'esforços com pot ser 'Ansys' o programes similars, el que permet fer estudis d'elements finits per a cada part que conforma el mecanisme.

Per això queda demostrat que el model utilitzat a aquest treball ofereix un ampli estudi per a components, moviments, relacions i esforços.

A més, a dia de hui els programes de disseny i simulat de components s'utilitzen molt en la indústria, ja que permeten avaluar les aptituds del sistema molt abans d'haver-se fabricat, això permet fer modificacions o millores en el model abans de ser verificat.

## 8. Plec de condicions



## 8. Plec de condicions

En aquest document s'han de incloure recomanacions, normes i instruccions que s'han de dur a terme per a poder realitzar el projecte de manera correcta.

Com es tracta d'un estudi completament realitzat a ordinador, no cal tindre en compte especificacions quant a materials o processos de muntatge. En ser un model computacional no es tindrà en compte l'impacte ambiental.

Per a poder realitzar aquest projecte, haurem d'aconseguir uns programes i unes llicències que ens permeten modelar i simular el mecanisme del que tracta el treball.

Els programes que s'han utilitzat són 'SolidWorks', 'Adams View' i 'Camtasia'. Per a poder utilitzar els programes 'SolidWorks' i 'Adams View' s'han d'obtenir una sèrie de requisits per al correcte funcionament d'aquests:

- Ordinador amb *hardware* i *software* compatibles.
- Memòria i espai en el disc dur.
- Obtindre un certificat per a la llicència del programa.

Per a poder utilitzar el programa 'Camtasia', s'ha optat per obtenir la versió de prova, que permet la utilització del software durant 30 dies.

Per últim, les característiques necessàries de l'ordinador per a que els programes funcionen correctament són:

- Intel CORE i5
- Targeta gràfica NVIDIA GEFORCE GTX 6300HQ
- Capacitat elevada disc dur
- Alta velocitat del processador, en aquest cas 2,3 GHz

## 9. Pressupost

## 9. Pressupost

### Treball personal

Concepte	Quantitat hores	€/h	Preu hores
Enginyer Mecànic	410 h	14 €/h	5740 €
Director projecte	25 h	22 €/h	550 €
		TOTAL	<b>6290 €</b>

### Software

Concepte	Quantitat hores	Preu llicència
SolidWorks	320 h	2045 €
Adams View	80 h	1900 €
Microsoft Office 2016	40 h	540 €
	TOTAL	<b>4485 €</b>

### Equipament informàtic

Concepte	Preu
Ordinador HP	750 €
TOTAL	<b>750 €</b>

Preu total del projecte 12155 €

Preu total projecte amb IVA **14707,55 €**

## 10. Bibliografia

## BIBLIOGRAFIA

- Abasolo, A. (2005). *Construcción y máquinas en edificación*. Madrid: Ed. Munilla-Lería.
- Barber, P. (2003). *Maquinaria de obras públicas II: máquinas y equipos*. Alacant: Ed Club Universitario.
- Costes, J. (1975). *Máquinas para movimiento de tierras*. Barcelona: Ed.Técnicos asociados.
- Madrid, A. (1998). *Modelización y simulación de una pala retroexcavadora mediante el programa Working Model (TFG)*. Universitat Politècnica de València, València, Espanya.
- Tiktin, J. (1997). *Procedimientos generales de construcción. Movimiento de tierras*. Madrid: Servicio de Publicaciones Ciudad universitaria.

## WEBGRAFIA

- Movimiento de tierras. Consultat des de [http://www.construmatica.com/construpedia/Movimiento\\_de\\_Tierras](http://www.construmatica.com/construpedia/Movimiento_de_Tierras)
- Equipos de excavación y carga de tierras. Consultat des de <http://procedimientosconstruccion.blogs.upv.es/category/excavaciones-y-voladuras/equipos-de-excavacion-y-carga-de-tierras/>

# 11. Agraïments

Aquest treball no s'hauria pogut dur a terme sense l'ajuda del tutor del projecte Josep Lluís Suñer Martínez, qui s'ha preocupat per la correcta realització del estudi. S'ha compromés a realitzar-lo de la millor manera possible i m'ha proporcionat moltes eines per a millorar el treball.

D'altra banda, he d'agrair el suport moral a la meua família, que m'ajudat a superar aquesta última etapa de la carrera. En concret agrair de tot cor la feina realitzada per la meua germana Cristina Castillo, que m'ha donat moltes recomanacions quant a l'assessorament lingüístic.

Per últim, agrair la formació rebuda per la Universitat Politècnica de València, que m'ha fet ser millor persona i estar més preparat per al futur.

