



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escola Tècnica
Superior d'Enginyeria
Informàtica

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Informàtica
Universitat Politècnica de València

Instrumentació i control mitjançant
microcontrolador d'un braç articulat

Treball Fi de Grau

Grau en Enginyeria Informàtica

Autor: Efren Camarasa Carreres

Tutor: Antonio Martí Campoy

2015/2016

Agraïments

Els meus agraïments van dirigits al meu tutor per tota l'ajuda i tot l'esforç que ha realitzat i per a la meua família pel seu suport durant aquests anys d'universitat.

Resum

El projecte realitzat té com a finalitat el control d'un braç articulat mitjançant un acceleròmetre incorporat en una placa experimental amb un microcontrolador. Addicionalment s'ha evitat el sobre esforç dels motors i s'ha substituït les piles que alimenten el braç articulat. Per a evitar el sobre esforç dels motors s'han incorporat uns sensors anomenats finals de carrera per a limitar el recorregut dels eixos que formen el braç articulat. En quant a la substitució de les piles, una font d'alimentació ha sigut connectada a la placa inferior del braç articulat.

La utilització dels acceleròmetres es cada dia més freqüent, ja que avui en dia molts dispositius incorporen un al seu interior, com per exemple els telèfons intel·ligents per a saber l'orientació de la pantalla. Els resultats obtinguts han sigut satisfactoris i els objectius plantejats a l'inici del projecte han sigut complits en la seua totalitat.

Paraules clau: braç articulat, acceleròmetre, microcontrolador, finals de carrera, font d'alimentació.

Resumen

El proyecto realizado tiene como finalidad el control de un brazo articulado mediante un acelerómetro incorporado en una placa experimental con un microcontrolador. Adicionalmente se ha evitado el sobreesfuerzo de los motores y se ha substituido las pilas que alimentan el brazo articulado. Para evitar el sobreesfuerzo de los motores se han incorporado unos sensores llamados finales de carrera para limitar el recorrido de los ejes que componen el brazo articulado. Respecto a la substitución de las pilas, una fuente de alimentación ha sido conectada a la placa inferior del brazo articulado.

La utilización de los acelerómetros es cada día más frecuente, ya que hoy en día muchos dispositivos incorporan uno en su interior, como por ejemplo los teléfonos inteligentes para saber la orientación de la pantalla. Los resultados obtenidos han sido satisfactorios y los objetivos planteados al inicio del proyecto han sido completados en su totalidad.

Palabras clave: brazo articulado, acelerómetro, microcontrolador, finales de carrera, fuente de alimentación.

Abstract

The project realized aims to control an articulated arm with a built- in accelerometer experimental board with a microcontroller. Additionally, engines overexertion has been avoided and the battery that feeds the articulated arm has been replaced. In order to avoid engines overexertion, we have incorporated sensors named limit switches to limit the travel of the axes that make up the articulated arm. Regarding the substitution of the battery, a power supply has been connected to the bottom plate of the articulated arm.

The use of accelerometers is increasingly common, since many devices today incorporate one inside, such as smart phones to know the orientation of the screen. The results have been satisfactory and the objectives set at the beginning of the project have been completed in full.

Keywords : articulated arm, accelerometer, microcontroller, limit switches, power supply.



Índex de figures

Figura 1: Posició inicial de la placa experimental	17
Figura 2: Posició per a moure l'eix número u positiu.....	17
Figura 3: Posició per a moure l'eix número u negatiu	18
Figura 4: Posició per a moure l'eix número dos positiu	18
Figura 5: Posició per a moure l'eix número dos negatiu	19
Figura 6: Posició per a moure l'eix número tres positiu	19
Figura 7: Posició per a moure l'eix número tres negatiu	20
Figura 8: Botons per a moure l'eix número quatre	20
Figura 9: Botons per a moure l'eix número cinc.....	21
Figura 10: Quick Shot Robot Arm SVI-2000	23
Figura 11: Correspondència del braç articulat amb el cos humà	24
Figura 12: Joysticks de control	24
Figura 13: Texas Instrument MSP-EXP430FR5739	26
Figura 14: Esquema Texas Instrument MSP-EXP430FR5739.....	26
Figura 15: Valors dels eixos de l'acceleròmetre	27
Figura 16: Sensibilitat dels eixos de l'acceleròmetre.....	28
Figura 17: Final de carrera	28
Figura 18: Esquema final de carrera	29
Figura 19: Relé.....	30
Figura 20: Targeta 8 relés	31
Figura 21: Targeta 4 relés	31
Figura 22: Esquema relé.....	32
Figura 23: Taula connexions	32
Figura 24: Font d'alimentació.....	33
Figura 25: Diagrama d'estats per a l'eix número u positiu.....	36
Figura 26: Diagrama d'estats per a l'eix número u negatiu	36
Figura 27: Diagrama d'estats per a l'eix número dos positiu	37
Figura 28: Diagrama d'estats per a l'eix número dos negatiu	37
Figura 29: Diagrama d'estats per a l'eix número tres positiu	38
Figura 30: Diagrama d'estats per a l'eix número tres negatiu	38

Figura 31: Diagrama d'estats per a l'eix número quatre.....	39
Figura 32: Diagrama d'estats per a l'eix número cinc	39
Figura 33: Esquema del muntatge.....	43
Figura 34: Connexions inferiors del braç articulat.....	44
Figura 35: Finals de carrera de l'eix número u	44
Figura 36: Finals de carrera de l'eix número dos.....	45
Figura 37: Finals de carrera de l'eix número tres	45
Figura 38: Finals de carrera de l'eix número quatre i número cinc	46
Figura 39: Placa del sistema de control.....	46
Figura 40: Protoboard	47
Figura 41: Connexions amb la font d'alimentació.....	47
Figura 42: Entorn IAR Embedded Workbench IDE.....	49
Figura 43: Entorn Energia IDE	50
Figura 44: Entorn Code Composer Studio	51
Figura 45: Vídeo demostració de l'eix número u i de l'eix número dos.....	53
Figura 46: Vídeo demostració de l'eix número quatre i de l'eix número cinc	53
Figura 47: Taula pressupost	55

Taula de continguts

1.	Introducció	13
1.1.	Motivació	13
1.2.	Entorn.....	13
1.3.	Objectius	13
2.	Requeriments.....	15
2.1.	Hardware.....	15
2.2.	Software	16
2.3.	Funcionament.....	17
3.	Hardware	23
3.1.	Braç articulat.....	23
3.2.	Texas Instrument MSP-EXP430FR5739.....	25
3.3.	ADXL335	27
3.4.	Finals de carrera.....	28
3.5.	Relés.....	29
3.6.	Font d'alimentació	33
4.	Software	35
4.1.	Disseny de l'aplicació	35
4.2.	Programa.....	40
5.	Muntatge.....	43
5.1.	Esquema.....	43
5.2.	Implementació	44
6.	Eines.....	49
6.1.	IAR Embedded Workbench IDE	49
6.2.	Llenguatge de programació	49



6.3.	Alternatives	50
6.3.1.	Energia IDE	50
6.3.2.	Code Composer Studio	51
7.	Demostració	53
8.	Pressupost.....	55
9.	Conclusió.....	57
10.	Bibliografia.....	59

1. Introducció

1.1. Motivació

Com a alumne del grau d'enginyeria informàtica m'apassiona tot allò relacionat amb la tecnologia, però com estudiant de l'especificació *enginyeria de computadors* he descobert la meva passió entorn al hardware. Em fascina les possibilitats que poden oferir les plaques experimentals disponibles en el mercat actual, per això quan vaig veure disponible aquest projecte no ho vaig dubtar ni un segon. Tot i així no havia treballat mai amb un acceleròmetre, la qual cosa suposava un gran repte per a mi, però amb l'ajuda del tutor i amb la gran quantitat de informació disponible en la xarxa he pogut comprendre el seu funcionament i aprendre un munt de coses noves molt interessants.

1.2. Entorn

L'entorn disponible per a aquest treball és aquell subministrat pel tutor. Es disposa d'un braç articulat, exactament un *Quick Shot Robot Arm SVI-2000* que es controla mitjançant un par de joysticks. Aquest braç articular està compost per cinc eixos, mitjançant els quals el braç és capaç de posicionar-se en una posició determinada, sempre i quan l'estructura del braç ho permeta.

També es disposa d'una placa experimental, concretament una *Texas Instrument MSP-EXP430FR5739* composta per diversos components entre els quals es troben un microcontrolador, un acceleròmetre i vint-i-quatre pins per a entrada i eixida que utilitzarem, entre altres components.

1.3. Objectius

L'objectiu principal d'aquest treball és el de substituir els joysticks que incorpora el braç articulat per a la seva manipulació per l'acceleròmetre que incorpora la placa experimental descrita en la secció *Hardware*, desenvolupant el software adient per al microcontrolador.

També es va establir com a objectiu que el braç articulat no siga forçat en els seus eixos. Per a poder dur a terme aquest objectiu, uns finals de carrera són incorporats per a que actuen com a sensors que delimiten el recorregut dels eixos.

L'últim objectiu es la substitució de les piles que alimenten el braç articulat per una font d'alimentació. D'aquest objectiu apareix un altre, protegir la etapa de potència que mou els motors, que és bipolar, de la part electrònica del microcontrolador, que és unipolar.

2. Requeriments

2.1. Hardware

- Control mitjançant acceleròmetre: Utilitzar l'acceleròmetre que incorpora la placa experimental per a controlar el braç articulat. Segons l'acceleració aplicada sobre els tres eixos espacials que es capaç de quantificar, moure els eixos corresponents.
- Botons integrats: L'acceleròmetre sols pot quantificar tres eixos, per la qual cosa es necessària la utilització dels botons integrats a la placa experimental per a controlar un dels dos eixos restants.
- Botons auxiliars: Per a poder moure tot el braç articulat es necessària la incorporació de dos botons auxiliars per a moure un dels eixos, ja que amb l'acceleròmetre i amb els botons integrats podem moure fins a un total de quatre eixos, quedant un d'ells sense control.
- Evitar sobreesforç dels motors: Incorporar un sensor mecànic capaç de notificar quan un eix ha arribat al final del seu recorregut possible i continuar movent-lo podria fer-lo malbé. Aquests sensors reben el nom de finals de carrera i son incorporats en llocs estratègics del braç articulat per a que aquest actue sobre ells.
- Alimentació del braç articulat: El braç articulat es alimentat per quatre piles de 1.5V cadascuna. Per a evitar la compra periòdica de les piles, incorporar una font d'alimentació externa que ens proporcione la mateix funcionalitat.
- Protecció de la etapa de potència: Per a aïllar electricament la part de control de la part de potència i evitar que un sobrevoltatge o sobrecorrent faça malbé la placa experimental es necessària la incorporació dels relés com elements de protecció.

2.2. Software

- Estructura: Per a facilitar la compressió dels fitxers creats per a la programació del microcontrolador inclòs en la placa experimental es necessari realitzar una programació modular, tant a nivell de funcions com de fitxers.
- Utilització d'interrupcions: Els sensors anomenats finals de carrera són digitals, aquests notificaran al programa desenvolupat el seu canvi d'estat mitjançant una interrupció.
- Exclusió entre botons: Físicament els botons incorporats al projecte poden ser polsats als mateix temps. Si aquests son polsats simultàniament donen lloc a un conflicte del sentit de gir del motor, per a evitar això, és necessari incorporar una exclusió mútua mitjançant software.
- Implementació mitjançant diagrames d'estats: Implementar el control del braç articulat mitjançant la creació de diagrames d'estats que tinguin en compte les possibles accions que poden ser realitzades.
- Canvi de sentit: Els eixos controlats per l'acceleròmetre son parats abans de canviar de sentit, ja que físicament al moure la placa experimental per a produir el sentit contrari a l'actual es dona lloc a una regió on es para el motor. Per als eixos manipulats per botons, per a poder canviar de sentit l'eix corresponent, és necessari que els dos botons no siguen polsats abans de canviar de sentit.

2.3. Funcionament

Per a realitzar el control del braç articulat s'establiren una sèrie de pautes a seguir per al seu correcte funcionament. En la figura 1 es mostra la posició inicial que deu tindre la placa experimental, en paral·lel a la superfície de la terra. Aquesta disposició ha sigut elegida per a una millor accessibilitat dels botons.

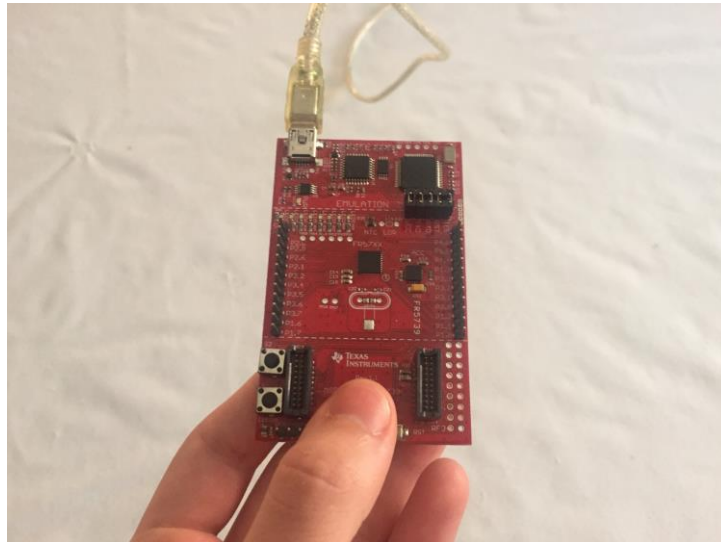


Figura 1: Posició inicial de la placa experimental

Per a moure el braç articulat cap a l'esquerra, és a dir, que el braç es gire sobre l'eix número u en sentit positiu, cal tombar la placa experimental cap a l'esquerra tal com es mostra en la figura 2.

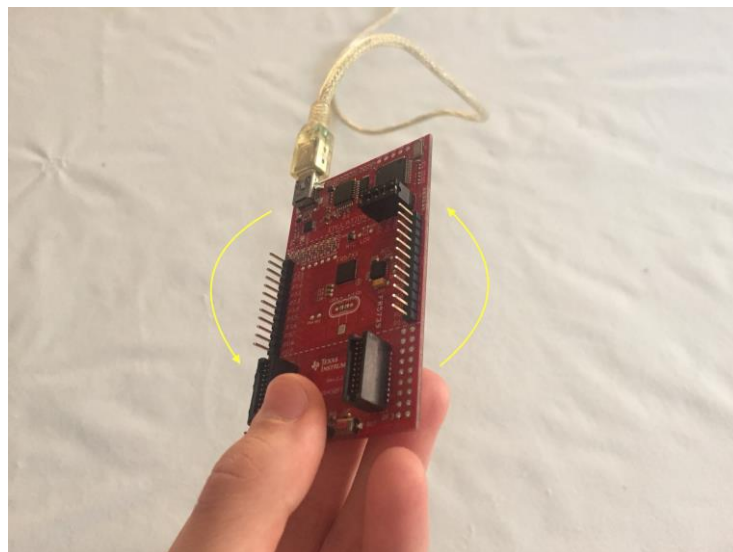


Figura 2: Posició per a moure l'eix número u positiu

Per a moure el braç articulat cap a la dreta o l'eix número u en sentit negatiu, cal fer el moviment contrari que per a moure'l cap a l'esquerra. Aquest moviment es mostra en la figura 3.

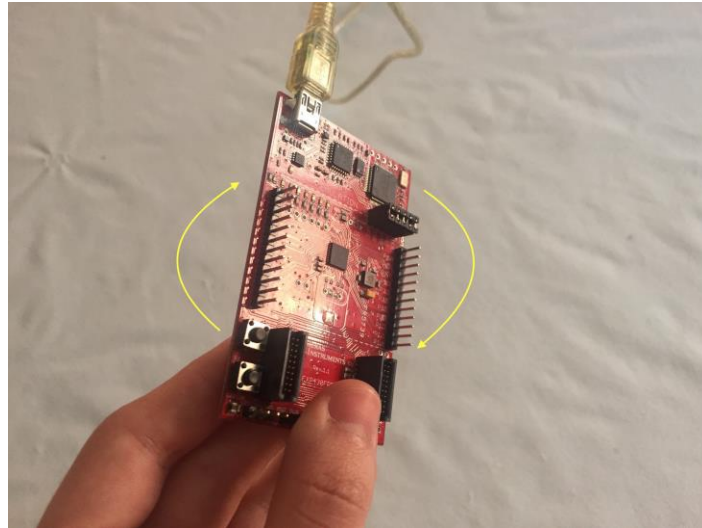


Figura 3: Posició per a moure l'eix número u negatiu

Respecte a l'eix número dos, per a moure el braç articulat en el seu sentit positiu hi ha que adoptar la posició mostrada en la figura 4, inclinar la placa experimental cap amunt.



Figura 4: Posició per a moure l'eix número dos positiu

Al igual que en l'eix número u, per a obtenir el moviment contrari en l'eix número dos hi ha que adoptar la posició contraria. En la figura 5 es mostra la posició per a moure l'eix número dos en el seu sentit negatiu.

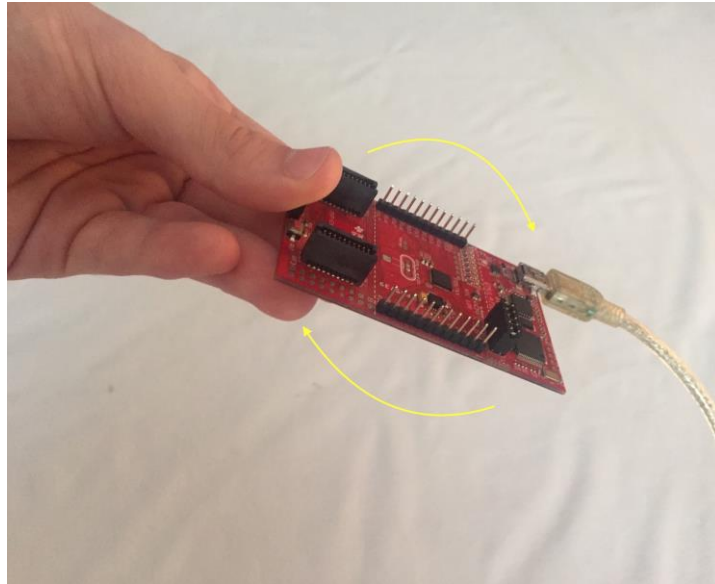


Figura 5: Posició per a moure l'eix número dos negatiu

A diferencia amb els dos eixos anteriors, l'eix número tres es mou amb el moviment de la placa experimental. Per a que l'eix número tres gire en el seu sentit positiu, hi ha que donar un colp cap a dalt, tal com mostra la figura 6.

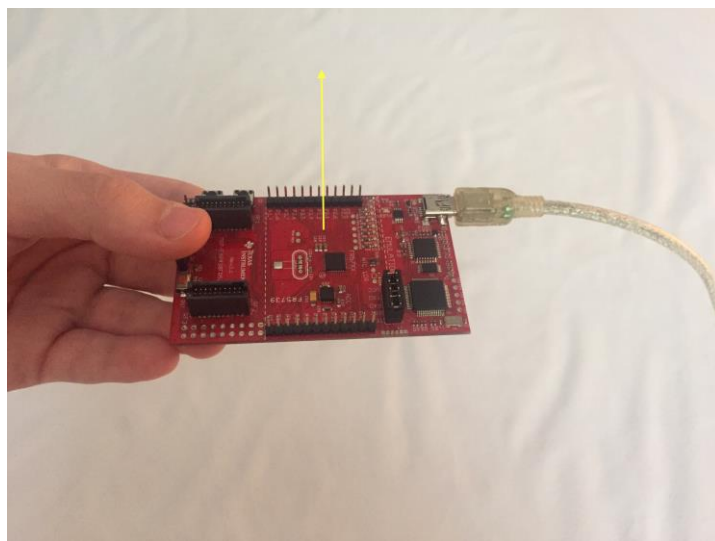


Figura 6: Posició per a moure l'eix número tres positiu

Al igual que els dos eixos anteriors, per a realitzar el moviment contrari en el braç articulat, també hi ha que realitzar el moviment contrari en la placa experimental. Per tant, per a moure l'eix número tres en el seu sentit negatiu, hi ha que donar un cop cap a baix com es mostra en la figura 7.

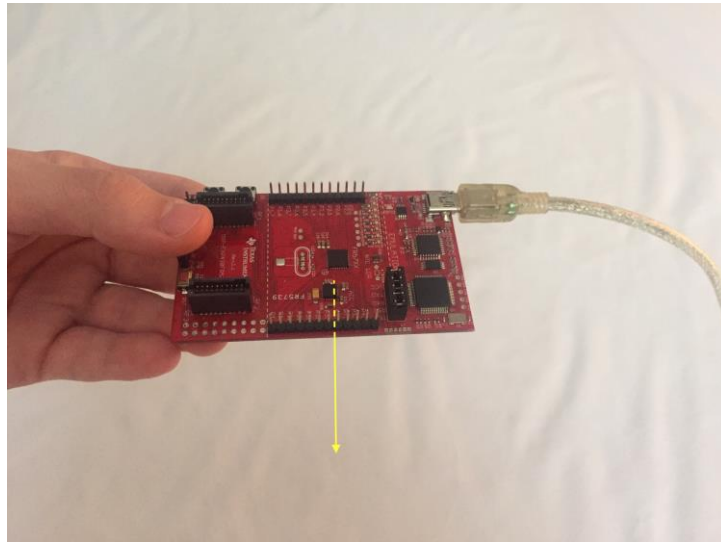


Figura 7: Posició per a moure l'eix número tres negatiu

Per al moviment de l'eix número quatre sols cal pulsar els botons disponibles en la placa experimental. Cadascú del botons mou l'eix en un sentit.

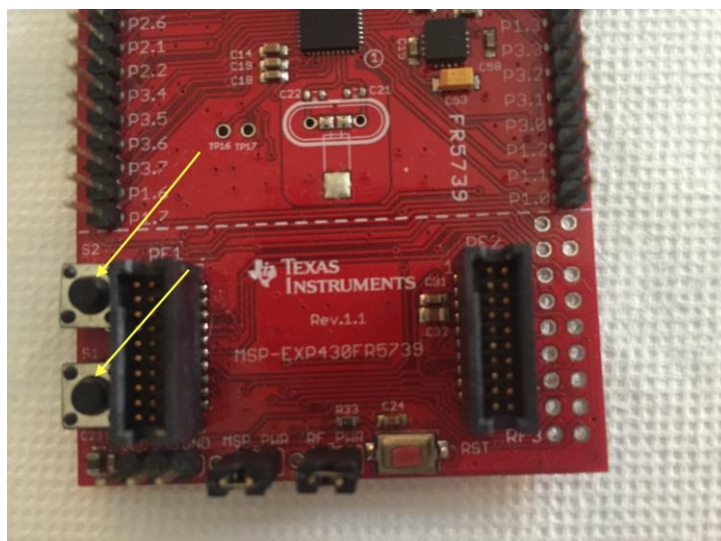


Figura 8: Botons per a moure l'eix número quatre

Al igual que l'eix número quatre, l'eix número cinc és controlat per dos botons. Aquests dos botons son afegits fora de la placa experimental. El procediment es igual que amb els botons de l'eix número quatre, cadascú dels botons mou l'eix en un sentit.

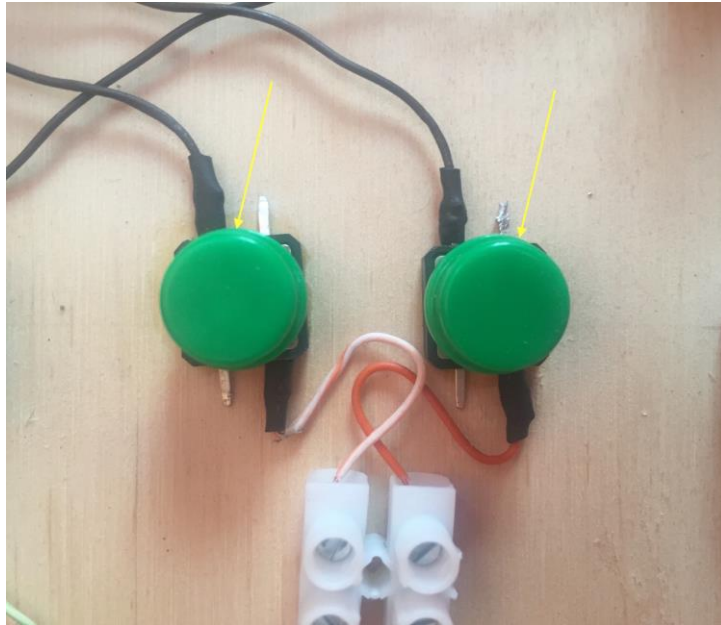


Figura 9: Botons per a moure l'eix número cinc

3. Hardware

3.1. Braç articulat

El braç articulat està format per cinc eixos. Aquests eixos li proporcionen mobilitat per a posicionar-se d'una forma determinada, segons les indicacions que li done l'usuari que estiga utilitzant-lo. Com es pot veure a la figura 10, l'eix número u és la base del braç articulat, aquest eix li permet girar-se amb relació a la superfície sobre la que reposa el braç articulat. L'eix número dos inclina el braç articulat cap endavant i cap enrere, perpendicularment a la base i l'eix número tres permet el moviment de la part superior del braç articulat. Els eixos quatre i cinc es troben en la part del braç articulat anomenada ferramenta. L'eix número quatre permet el gir sobre ella mateix i l'eix número cinc implementa la funcionalitat de la ferramenta incorporada, en aquest cas una pinça que s'obri i es tanca.



Figura 10: Quick Shot Robot Arm SVI-2000

Si comparem el braç articulat amb el cos humà, tenim la correspondència que es mostra a la figura 11.

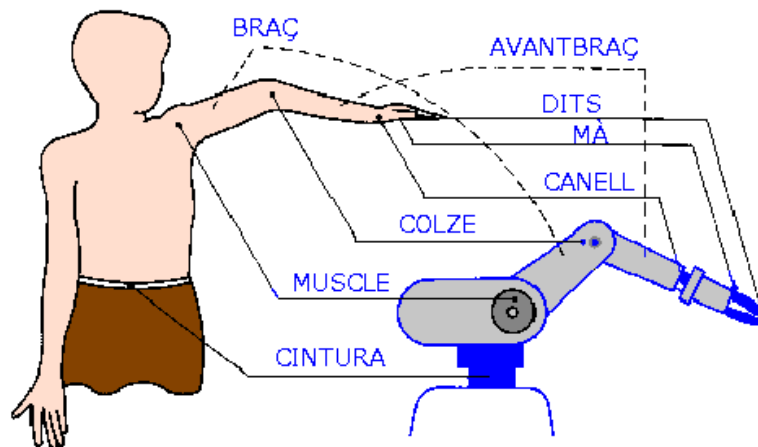


Figura 11: Correspondència del braç articulat amb el cos humà

Dos joysticks permeten el control de tots els eixos del braç. El posicionament de les palanques dels joysticks accionen o paren els motors que controlen els eixos. Podem obtenir fins a deu moviments distints, un per a cada sentit dels eixos. Cada palanca es mou cap endavant, cap enrere, cap a la dreta i cap a l'esquerra, obtenint huit moviments. Els dos restants s'obtenen mitjançant els botons que incorporen els joysticks. Els dos botons de cada joystick tenen la mateixa finalitat, per tant ens atorguen dos moviments més i no quatre, fent el total de deu moviments.



Figura 12: Joysticks de control

3.2. Texas Instrument MSP-EXP430FR5739

La placa seleccionada per aquest treball ha sigut la MSP-EXP430FR5739, subministrada pel tutor.

Aquesta placa experimental està dissenyada per Texas Instrument. El seu principal component és un microcontrolador MSP430FR5739 amb una arquitectura de 16 bits i amb una freqüència de 8 MHz. Aquest microcontrolador està acompanyat per diversos components i perifèrics que es numeren a continuació:

- Un acceleròmetre de tres eixos.
- Una resistència NTC.
- Huit leds.
- Dos botons.
- Vint-i-quatre pins d'entrada/eixida.
- Convertidor analògic/digital de deu bits, intern al propi microcontrolador.
- El microcontrolador porta incorporat un On-Chip Debug System, i la placa incorpora els dispositius necessaris per a connectar aquest depurador intern amb un PC emprant un cable USB. Açò fa que tot el procés de desenvolupament i prova del software siga senzill.

Com el braç articulat disposa de cinc eixos, necessitem deu eixides per a la seva manipulació, ja que cada eix disposa d'una part positiva i una altra negativa per moure l'eix en un sentit i en el contrari. També son necessàries sis entrades per als finals de carrera i dues més per a dos botons auxiliars per a moure un dels eixos, ja que amb l'acceleròmetre es mouen tres eixos i amb els botons integrats un altre eix. Les eixides proporcionades per l'acceleròmetre estan connectades amb tres pins d'entrada, per tant es necessiten un total de vint-i-u pins d'entrada/eixida. Com aquesta placa disposa de vint-i-quatre pins d'entrada/eixida pot albergar la solució a aquest treball.

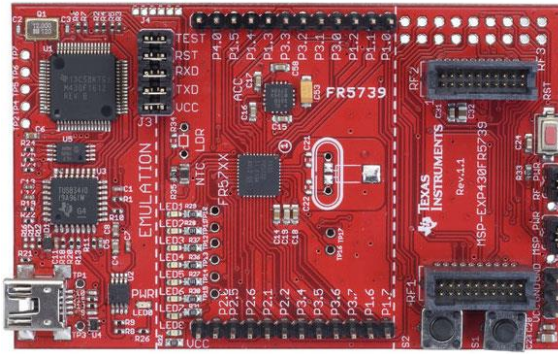


Figura 13: Texas Instrument MSP-EXP430FR5739

En la imatge 14 es pot veure un dels esquemes de la placa experimental utilitzada, on es pot veure que les eixides de l'acceleròmetre estan connectades a tres pins d'entrada. L'eixida de l'eix X amb el pin P3.0, l'eixida de l'eix Y amb el pin P3.1 i l'eixida de l'eix Z amb el pin P3.2.

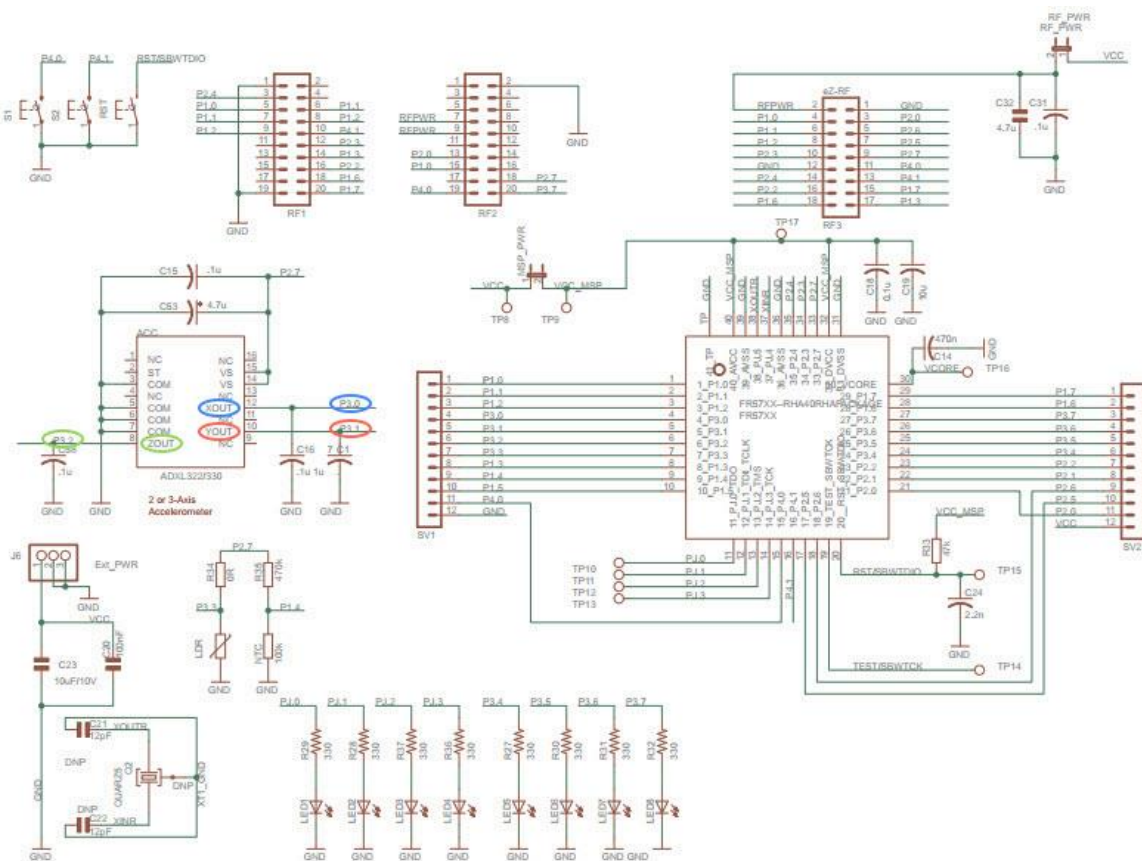


Figura 14: Esquema Texas Instrument MSP-EXP430FR5739

3.3. ADXL335

Com s'ha exposat a l'apartat 3.2. la placa experimental incorpora un acceleròmetre de tres eixos, concretament el model ADXL335. Les eixides que proporciona aquest acceleròmetre son ratiomètriques, és a dir, els valors proporcionats depenen del voltatge que rep com a alimentació. En la figura 15 es pot veure com canvia el valor de l'acceleració segons la posició de l'acceleròmetre. Per a una acceleració de 0g, el voltatge que l'acceleròmetre proporciona es igual a $V_{cc}/2$, on V_{cc} és la seva alimentació.

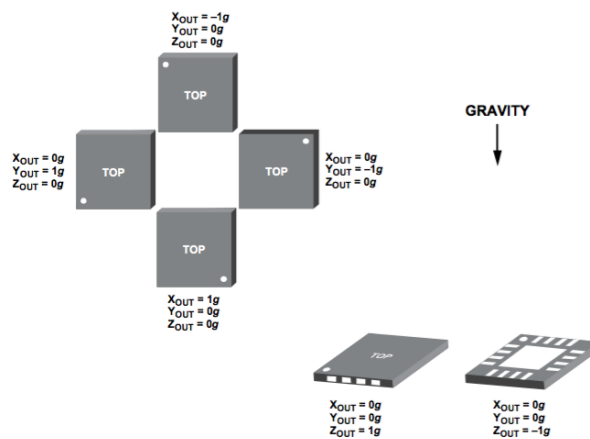


Figura 15: Valors dels eixos de l'acceleròmetre

La placa experimental proporciona una alimentació de 3.6V per a l'acceleròmetre. Segons el fabricant de l'acceleròmetre, per a aquesta alimentació la sensibilitat és de 360mV/g. Com que el convertidor analògic/digital és de deu bits quan la força mesurada és de 0g, donant un voltatge d'eixida de $3,6V/2 = 1.8V$, el convertidor retornarà un valor aproximat de 512 ($1023/2$). Per a mesurar el valor en volts de les variacions de les forces g hi ha que sumar o restar 360mV. Per exemple, si tenim una força de +1g, als 1.8V proporcionats quan la força mesurada és 0g hi ha que sumar-li 360mV, donant lloc a 2.16V. Pel contrari, si la força mesurada és de -1g, als 1.8V hi ha que restar-li 360mV, obtenint 1.44V. En la figura 16 es pot veure l'orientació del xip respecte dels tres eixos.

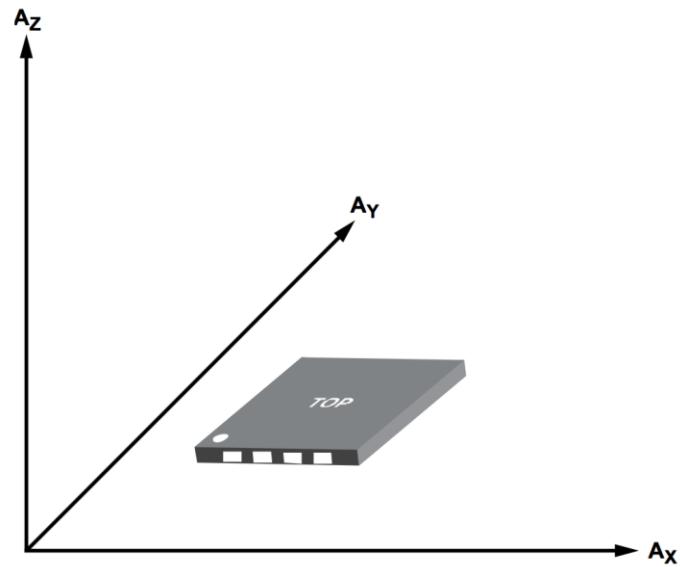


Figura 16: Sensibilitat dels eixos de l'acceleròmetre

3.4. Finals de carrera

Del total dels cinc eixos, només un d'ells pot girar sense fi, mentre que tots els altres tenen un recorregut limitat per la construcció del braç o pels elements electromecànics que mouen les parts. Per a evitar el sobre esforç dels eixos al arribar al seu límit, evitant fer malbé els motors o els engranatges, s'han incorporat uns finals de carrera per a detectar el límit de cada eix.



Figura 17: Final de carrera

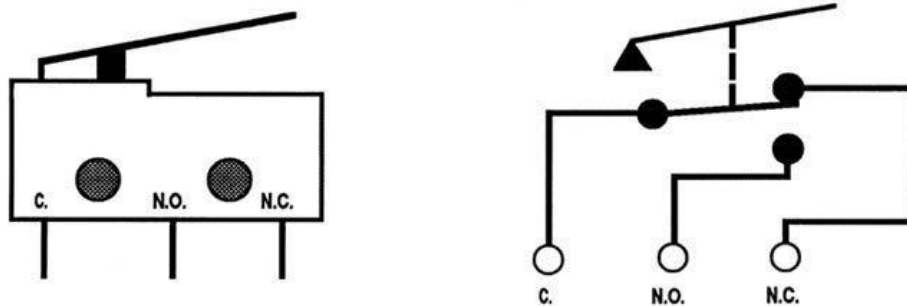


Figura 18: Esquema final de carrera

Aquest sensor està compost per tres terminals. Aquests terminals reben el nom de comú, normalment obert i normalment tancat. En la figura 18 es poden identificar els tres terminals nomenats. El terminal denominat amb el nom de comú connecta amb els terminals normalment obert i normalment tancat depenent de la situació de la palanca incorporada. Si la palanca no està polsada, el terminal comú connecta amb el terminal normalment tancat i en canvi si la palanca està polsada, el terminal comú connecta amb el terminal normalment obert.

Per a la realització del treball s'ha connectat el terminal normalment obert a 3.3V, proporcionats per un dels pins de la placa experimental. El terminal normalment tancat ha sigut connectat a massa i el terminal comú connectat al pin de la placa experimental que llegeix el seu estat. Per tant, si el sensor està polsat mitjançant la seva palanca, en la placa es llegiran 3.3V, un 1 digital, i si en canvi el sensor no està polsat es llegiran 0V, un 0 digital. D'aquesta manera, quan una de les parts del braç arribe al final del recorregut, pressionarà la palanca i el motor que proporciona aquest moviment serà aurat pel software que s'executa en el microcontrolador.

3.5. Relés

La funcionalitat dels joysticks dels que disposa el braç articulat es la d'unir els terminals dels motors amb l'alimentació positiva i negativa, per a fer girar el motor en un sentit, l'altre o en cap. Aquesta funció es realitza mitjançant els connectors DB9 existents a la base del braç.

Per a la substitució dels joysticks s'han utilitzat relés, que a més a més de realitzar la mateixa funció que el joystick ofereix aïllament elèctric entre el microcontrolador i la etapa de potència dels motors del braç.

Un relé té el mateix funcionament que un final de carrera, explicat en l'apartat 3.4., però en comptes de commutar per una acció mecànica, commuta en resposta a un senyal elèctric. Al igual que un final de carrera, conté un terminal anomenat comú que connecta amb els altres dos terminals anomenats normalment obert i normalment tancat.

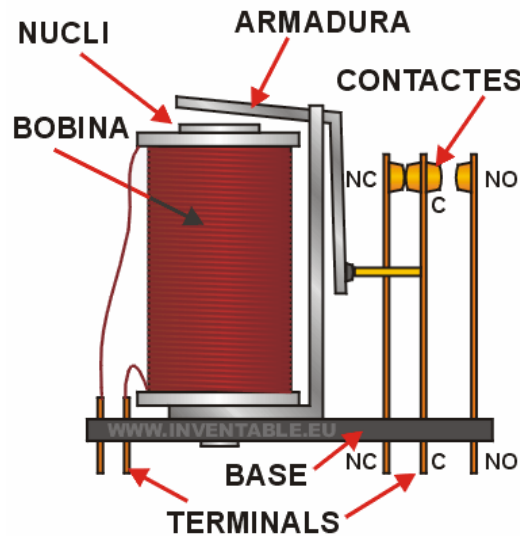


Figura 19: Relé

En el cas del relés, el terminal anomenat comú es connecta al pin del connector DB9 connectat a la massa i el terminal normalment obert està connectat al pin que controla el moviment de l'eix, deixant el terminal normalment tancat sense connexió. D'aquesta manera quan es tanca el circuit la corrent del motor circula i fa girar l'eix seleccionat en la direcció elegida.

Com el braç articulat disposa de cinc eixos multidireccionals, son necessaris deu relés per al seu control. Com amb una targeta de huit relés no era suficient, s'utilitzà una segona de quatre relés i no de huit relés per a reduir l'espai ocupat.

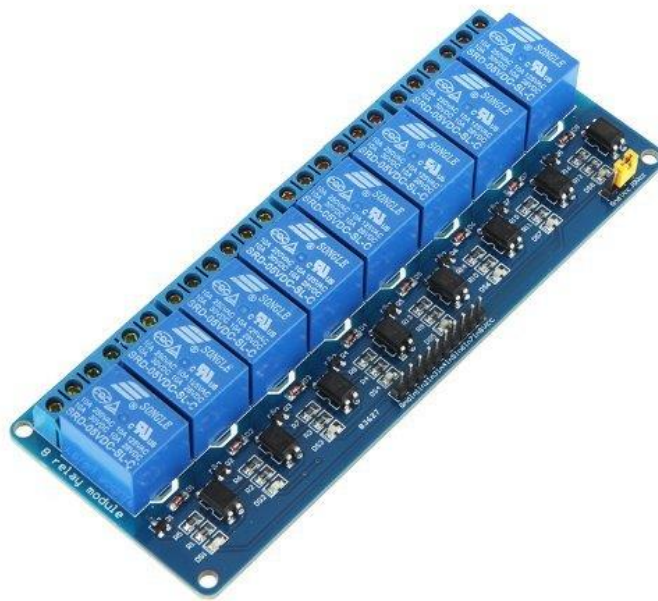


Figura 20: Targeta 8 relés

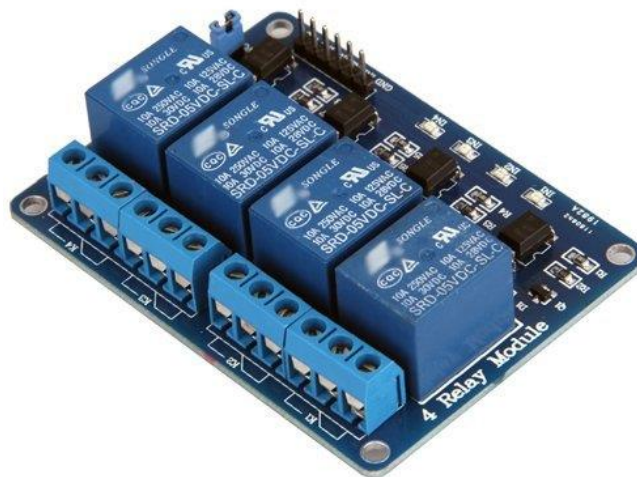


Figura 21: Targeta 4 relés

La característica principal que contenen aquestes targetes es que cada relé disposa d'un component anomenat optoacoplador. La funcionalitat d'aquest component és la de separar en diferents parts el circuit, per a que si circulen grans corrents pel circuit, les parts més vulnerables no es vegen afectades.

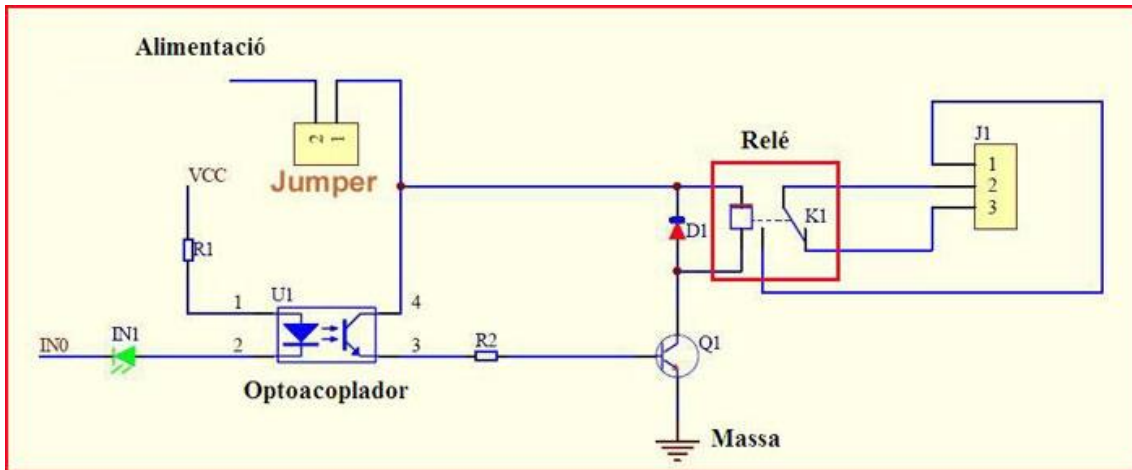


Figura 22: Esquema relé

Per a saber com connectar els relés amb les entrades del braç articulat, primer es tingueren que identificar quin pins dels connectors DB9 feia referència a cada eix. Amb l'ajuda d'un multímetre es pogué dur a terme aquesta identificació de pins i obtenir aquests resultats.

Pins	ARM 1	ARM 2
Pin 1	Eix 2 negatiu	Eix 3 negatiu
Pin 2	Eix 2 positiu	Eix 3 positiu
Pin 3	Eix 1 positiu	Eix 4 negatiu
Pin 4	Eix 1 negatiu	Eix 4 positiu
Pin 5	No te efecte	No te efecte
Pin 6	Eix 5 negatiu	Eix 5 positiu
Pin 7	No te efecte	No te efecte
Pin 8	Comú	Comú
Pin 9	No te efecte	No te efecte

Figura 23: Taula connexions

Com es pot veure, el pin número huit és el comú per a la resta de pins, aquest pin està connectat directament a la massa de potència del braç articulat. Per tant, per a moure l'eix u en sentit positiu del braç articulat, per exemple, tan sols es necessari connectar el

pin número tres del primer connector DB9 o ARM1 amb el pin número huit del mateix connector. Per a la realització dels moviments restants seria el mateix procediment però amb els seus pins corresponents.

3.6. Font d'alimentació

Per a la substitució de les piles que formen l'alimentació del braç articulat es va utilitzar una font d'alimentació proporcionada pel tutor. Aquesta font te diversos modes de funcionament, un dels modes configura la font amb una polaritat positiva i una altra negativa, amb una massa de potència comuna. Per a aconseguir aquest últim mode tan sols hi ha que seleccionar el botó *SERIES* que proporciona la font. En la figura 24 es mostra la distribució resultant de la selecció del mode nombrat.



Figura 24: Font d'alimentació

4. Software

4.1. Disseny de l'aplicació

El control del sistema s'ha dissenyat seguint el model de màquina d'estats, ja que permet representar amb facilitat el comportament del eixos del braç, si està en moviment o no, o si ha arribat al final del recorregut. Encara que és possible dissenyar un únic autòmat per a tot el sistema, per a reduir la complexitat es tractarà cada eix per separat.

L'eix número u presenta dues característiques importants. La primera és que és controlat mitjançant l'acceleròmetre, inclinant cap a un costat o l'altre la placa experimental, per tant és impossible que la placa estiga inclinada simultàniament cap els dos costats, el que dona una exclusivitat física en les entrades. La segona característica és que el moviment està limitat en els dos extrems del gir, detectat per dos entrades diferents. Açò permet utilitzar dos autòmats independents, un per a cada sentit de gir. La figura 25 presenta el diagrama d'estats per a l'eix número u positiu i la figura 26 presenta el diagrama d'estats per a l'eix número u negatiu. Per a representar el comportament de l'autòmat s'ha utilitzat una representació gràfica comuna en la disciplina, on el cercle indica l'estat amb el seu nom simbòlic, el valor dins de les corxeres indica el valor de l'eixida o eixides per a eixe estat (autòmat de Moore), i les fletxes indiquen les transicions possibles entre estats en funció de les variables de entrada. Els eixos dos i tres presenten el mateixos requeriments que l'u, per la qual cosa els diagrames d'estats són els mateixos, canviant només les connexions de les entrades i eixides.

En quant a l'eix número quatre i l'eix número cinc, les seues característiques es que està controlat per dos botons que poden estar pressionats al mateix temps, i per tant no es pot separar el disseny en dos diagrames. L'altra característica es que no hi ha finals de carrera.

En aquests diagrames *accel_n* ($n \in \{x,y,z\}$) és el valor llegit per l'acceleròmetre per a l'eix n . *Umbral_n_superior* i *umbral_n_inferior* ($n \in \{x,y,z\}$) són els valors a partir dels quals es considera que l'acceleració o inclinació de la placa és prou per a activar l'eix corresponent. Per últim, *botó_n* ($n \in \{1,2,3,4\}$) i *final_de_carrera_nm* ($n \in \{1,2,3\}$, $m \in \{p,n\}$) indiquen l'activació del polsador o dels finals de carrera.

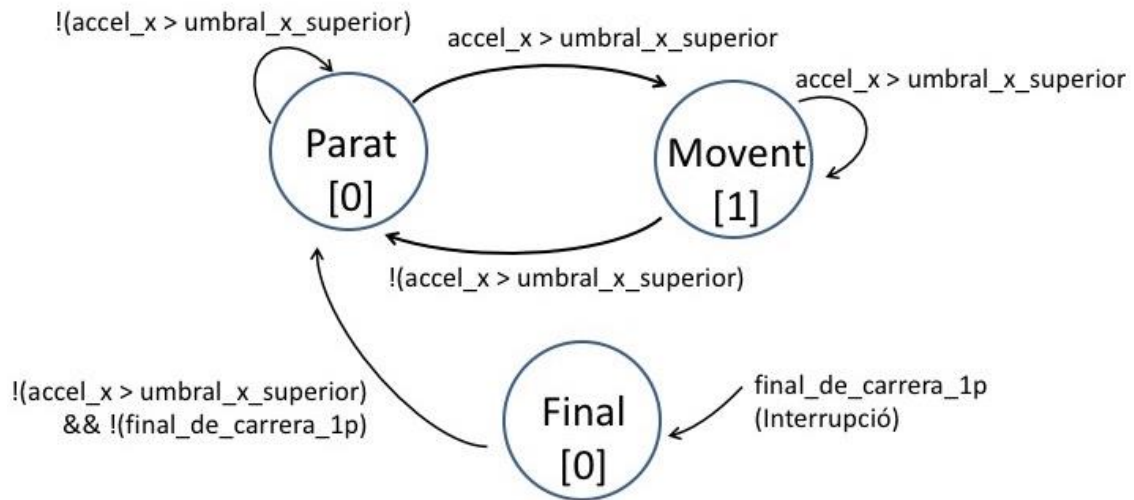


Figura 25: Diagrama d'estats per a l'eix número u positiu

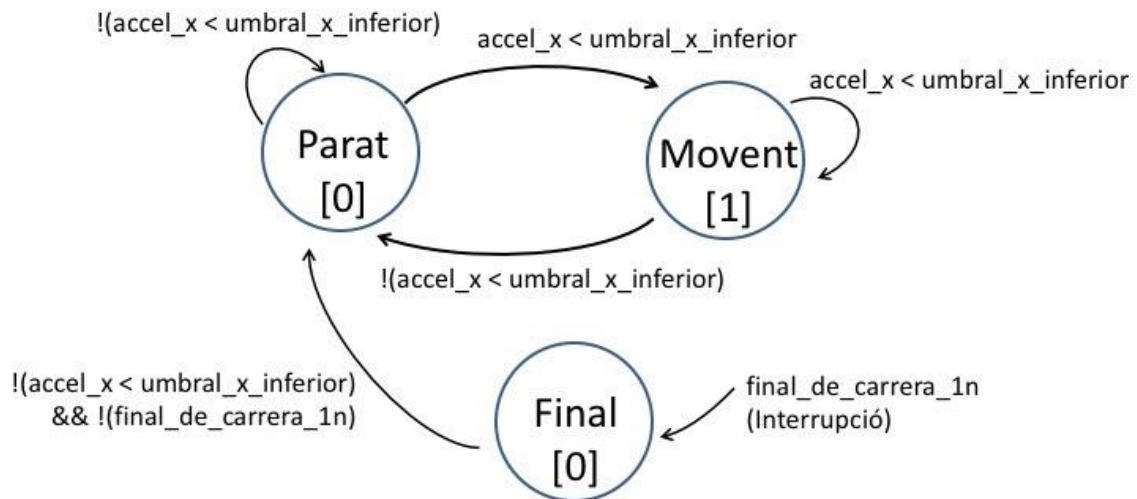


Figura 26: Diagrama d'estats per a l'eix número u negatiu

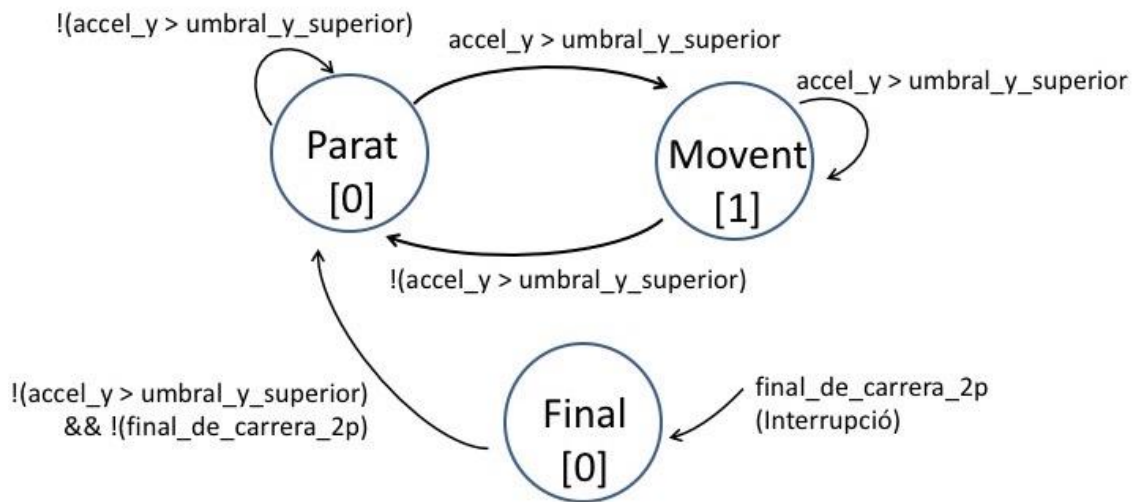


Figura 27: Diagrama d'estats per a l'eix número dos positiu

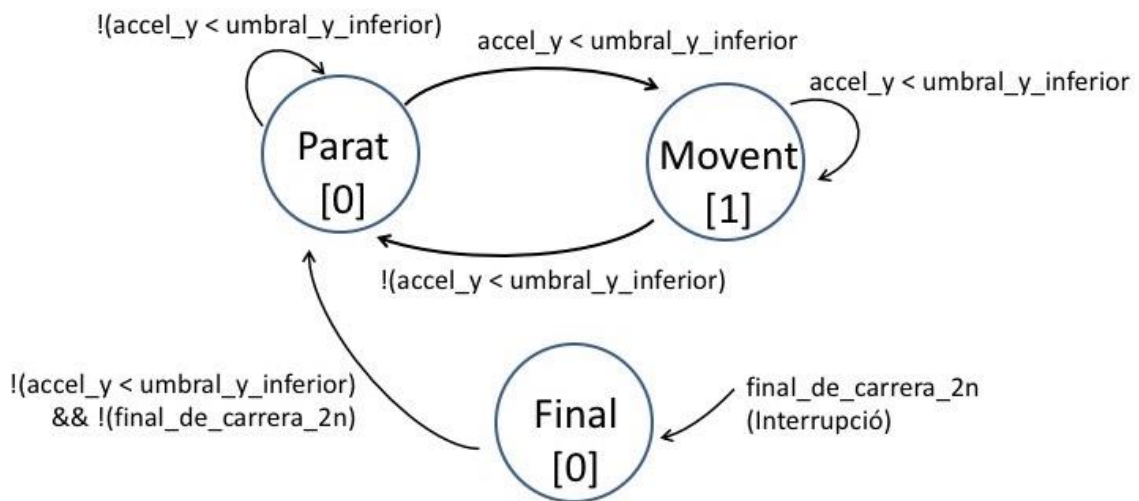


Figura 28: Diagrama d'estats per a l'eix número dos negatiu

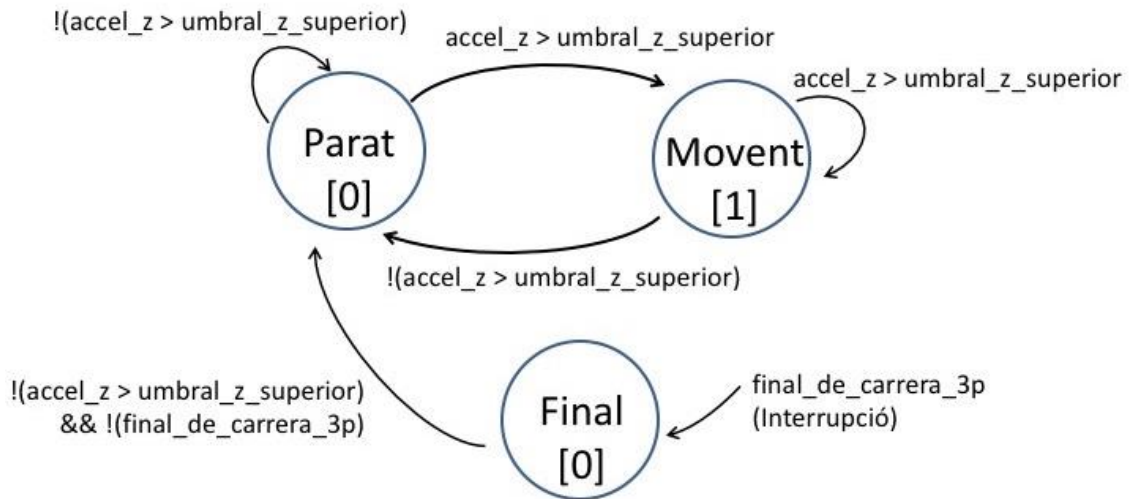


Figura 29: Diagrama d'estats per a l'eix número tres positiu

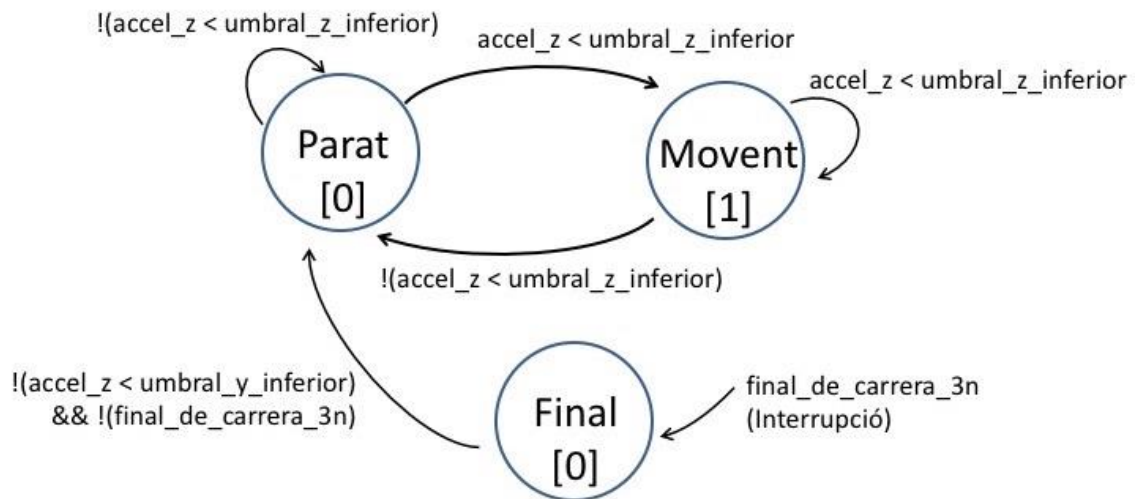


Figura 30: Diagrama d'estats per a l'eix número tres negatiu

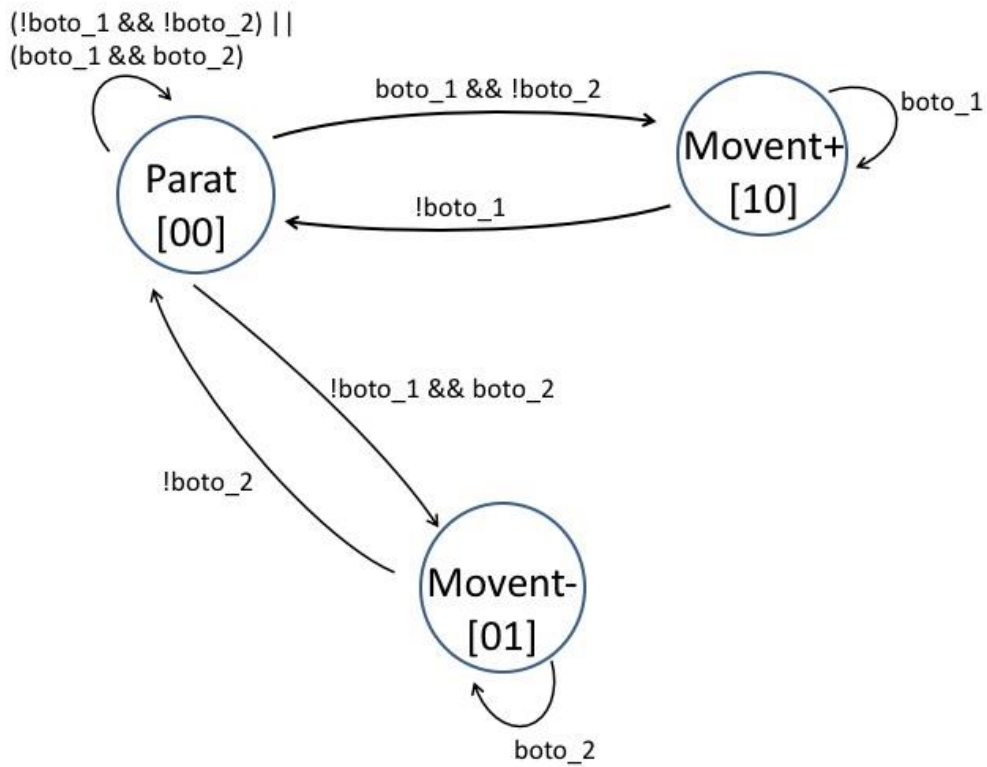


Figura 31: Diagrama d'estats per a l'eix número quatre

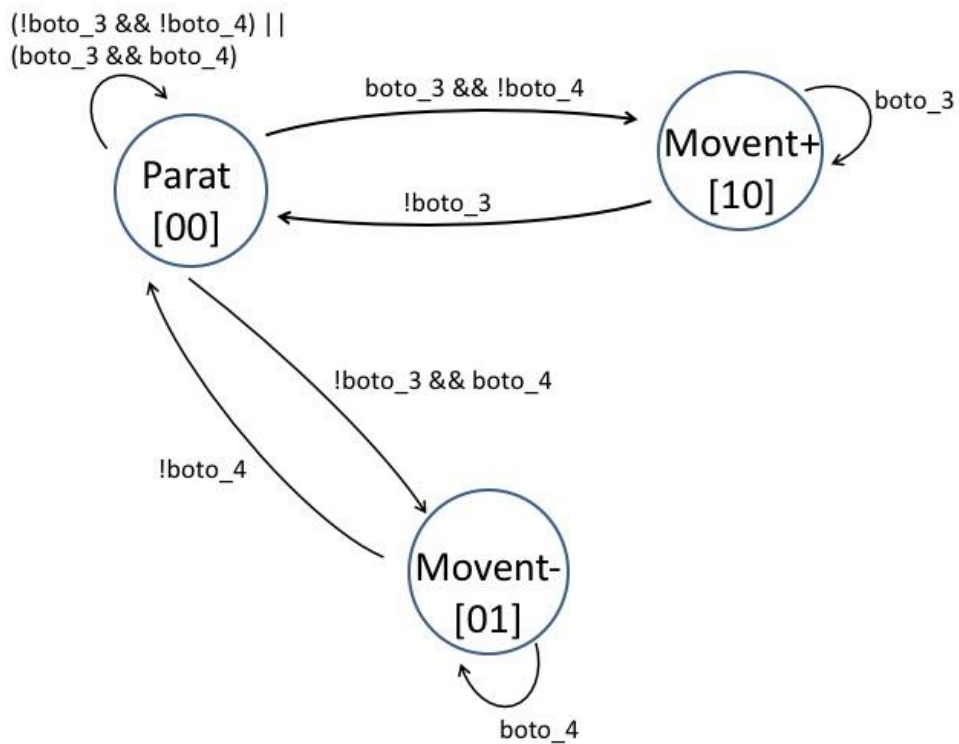


Figura 32: Diagrama d'estats per a l'eix número cinc

La traducció dels diagrames a codi de programació s'ha fet combinant l'ús d'interrupcions i el *polling*. S'han utilitzat interrupcions per als finals de carrera i *polling* per a les eixides de l'acceleròmetre i els botons que controlen els eixos número quatre i número cinc.

4.2. Programa

Un dels requeriments del treball era fer una programació modular. Per complir amb aquest requeriment l'aplicació s'ha dividit en sis mòduls més un fitxer amb el codi principal.

Els mòduls desenvolupats son els següents:

- *entrades.h* i *entrades.c*: Conté les funcions i declaracions necessàries per configurar deu pins dels disponibles per a que actuen com a entrades. Aquests pins tenen connectats els finals de carrera i els quatre botons utilitzats per al control del braç articulat. També configura una resistència *pull-up* interna per als pins connectats amb els botons.
- *eixides.h* i *eixides.c*: Conté les funcions i declaracions necessàries per configurar deu pins dels disponibles per a que actuen com a eixides. Aquests pins estan connectats a les entrades dels relés per a la seua activació i desactivació, amb el fi de controlar els moviments del braç articulat.
- *acc.h* i *acc.c*: Conté les funcions i declaracions necessàries per configurar l'acceleròmetre per a la seva utilització i el convertidor d'analogic a digital per a poder mesurar les eixides de l'acceleròmetre.
- *botons.h* i *botons.c*: Conté les funcions necessàries per a la comprovació dels estats dels botons, és a dir, ens informa de si un botó ha sigut premut.
- *estats.h* i *estats.c*: Conté les funcions que implementen els autòmats que controlen els eixos del braç.
- *interrupcions.h* i *interrupcions.c*: Conté les funcions i declaracions necessàries per configurar els pins d'entrada on estan connectats els finals de carrera per a que siguin tractats com una interrupció.

Per a accedir als recursos hardware del microcontrolador s'han utilitzats les definicions incloses en el fitxer *msp430fr5739.h*, proporcionat per l'entorn de programació (IAR Embedded Workbench).

En la funció *main* ubicada en el fitxer *main.c* es declaren les constants i les variables necessàries per emmagatzemar l'estat de les diferents entrades i eixides, així com els estats dels diferents autòmats dissenyats per a controlar els moviments. Totes les variables són discretes, de tipus enter, variant segons la necessitat la grandària i el signe. Seguidament es criden les funcions de inicialització i configuració dels perifèrics, a continuació s'executa un bucle infinit on per a cada eix es comprova la seva situació actual donada per el seu diagrama d'estats, ja siga un dels eixos mogut per l'acceleròmetre o pels botons. Segons l'estat actual de l'eix en el seu corresponent diagrama d'estats, s'activa o es desactiva el relé corresponent a l'eix.

5. Muntatge

5.1. Esquema

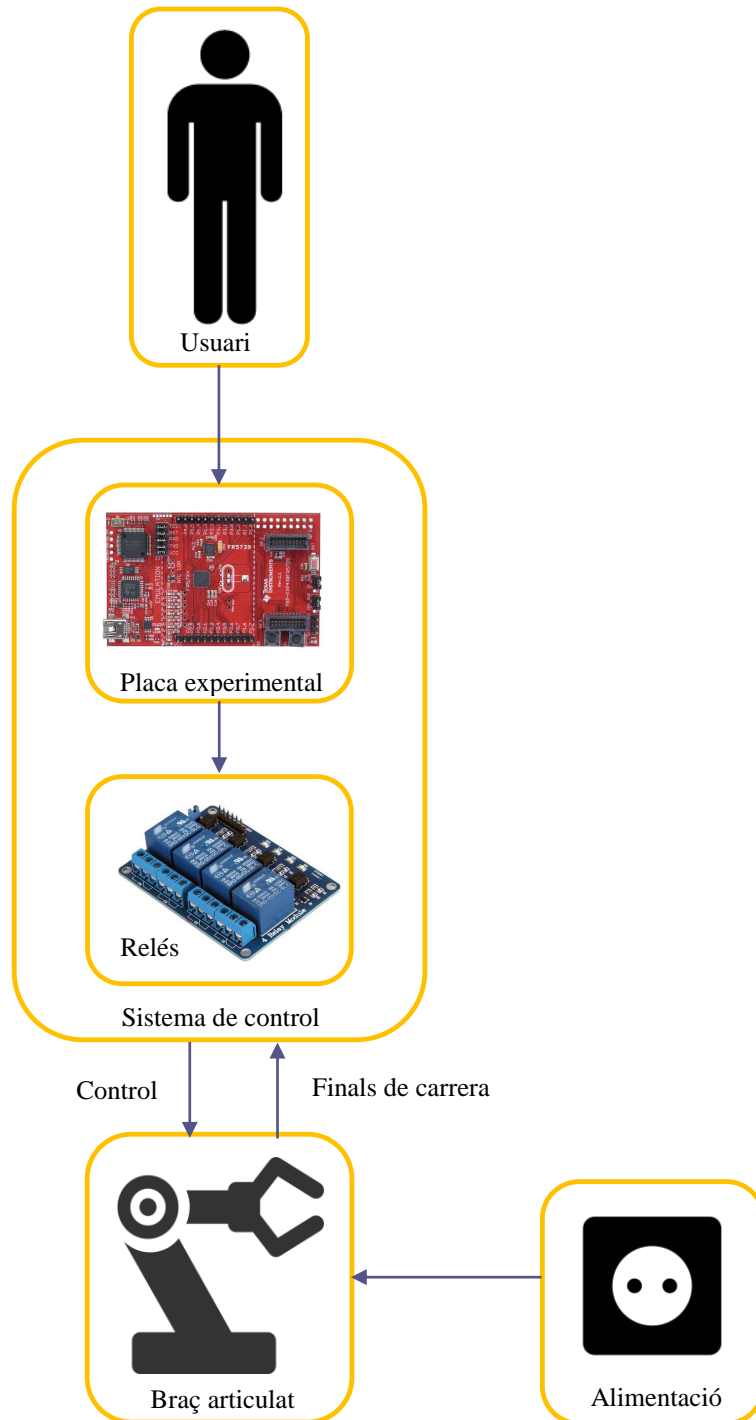


Figura 33: Esquema del muntatge

5.2. Implementació

Per a la substitució del subministrament elèctric del braç articulat es soldaren tres cables a la placa inferior. Dels quatre connectors disponibles, dos tenen la mateixa funció, la massa de potència. Els altres dos restants són la polaritat positiva i la polaritat negativa. En la figura 34 es mostra el resultat de les connexions.

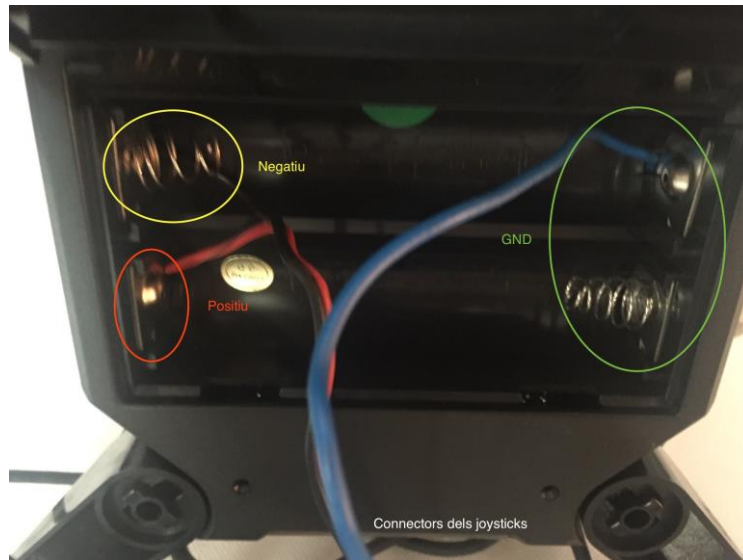


Figura 34: Connexions inferiors del braç articulat

Per a evitar el sobreesforç de l'eix número u s'incorporaren dos finals de carrera en els extrems de la base. Aquests finals de carrera són premuts mitjançant dues palanques incorporades en la part frontal del braç articulat.



Figura 35: Finals de carrera de l'eix número u

Al igual que en l'eix número u, en l'eix número dos també es tingué que incorporar una peça addicional per a que els finals de carrera siguen premuts. Al igual que l'eix número u, la peça incorporada avança cap als finals de carrera polsant-los quan arriba al final del seu recorregut.



Figura 36: Finals de carrera de l'eix número dos

En l'eix número tres s'afegí la mateixa peça que en l'eix número dos per a que els finals de carrera siguen premuts. En aquest cas la peça incorporada no es mou, sinó que serà alcançada per un dels finals de carrera incorporats per a aquest eix, ja que l'altre final de carrera es premut quan aquest contacta amb la estructura del braç articulat.



Figura 37: Finals de carrera de l'eix número tres

Com es pot observar en la figura 38, per als eixos número quatre i número cinc no s'incorporaren finals de carrera ja que l'eix número quatre gira indefinidament, per lo tant no es mai forçat i no es possible la incorporació a l'eix número cinc sense interferir amb el funcionament de la pinça incorporada.



Figura 38: Finals de carrera de l'eix número quatre i número cinc

En la figura 39 es mostra el resultat del sistema de control implementat. Es poden veure les dues targetes que incorporen relés, dos botons per a la manipulació d'un dels eixos del braç articulat i les connexions necessàries que connecten amb el braç articulat i amb la placa experimental.

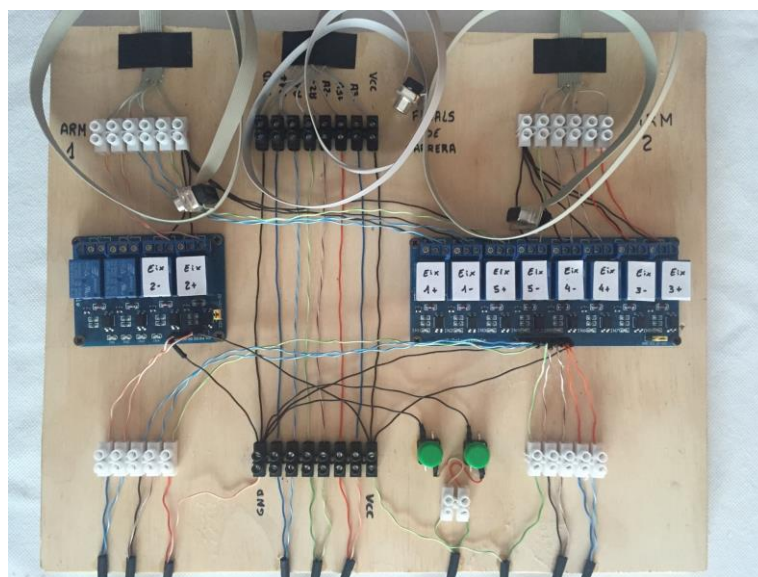


Figura 39: Placa del sistema de control

Per a fer més flexible el sistema implementat, s'ha incorporat una *protoboard* a la placa experimental per a poder extraure aquesta quan siga necessari.

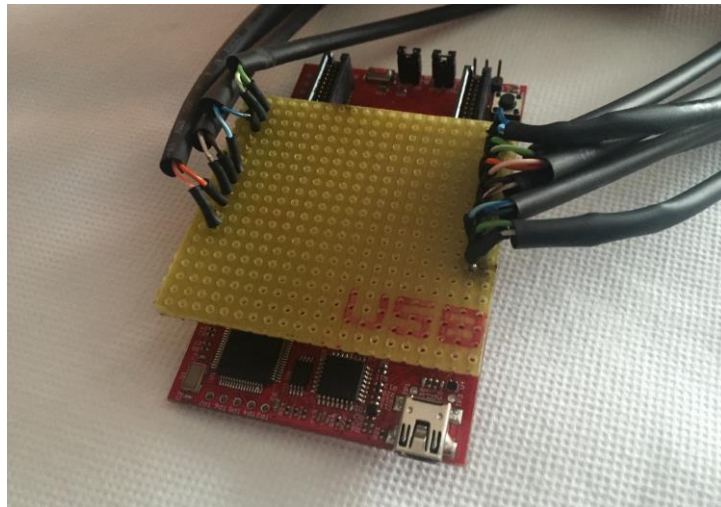


Figura 40: Protoboard

Les connexions de l'alimentació que ixen del braç articulat son connectades a la font d'alimentació exposada en l'apartat 3.6. Aquestes connexions son mostrades en la figura 41.



Figura 41: Connexions amb la font d'alimentació

6. Eines

6.1. IAR Embedded Workbench IDE

IAR Embedded Workbench IDE va ser l'entorn de programació escollit per a la realització del codi de la placa experimental per la recomanació i experiència del tutor. Aquest entorn utilitza el llenguatge C per a la programació dels dispositius als que dona suport. Incorpora una finestra lateral per a navegar en els diferents projectes creats. És una eina professional (encara que és possible utilitzar una versió limitada gratuïta) que incorpora tant l'editor, el compilador, l'enllaçador i el depurador, el que facilita la tasca del desenvolupador.

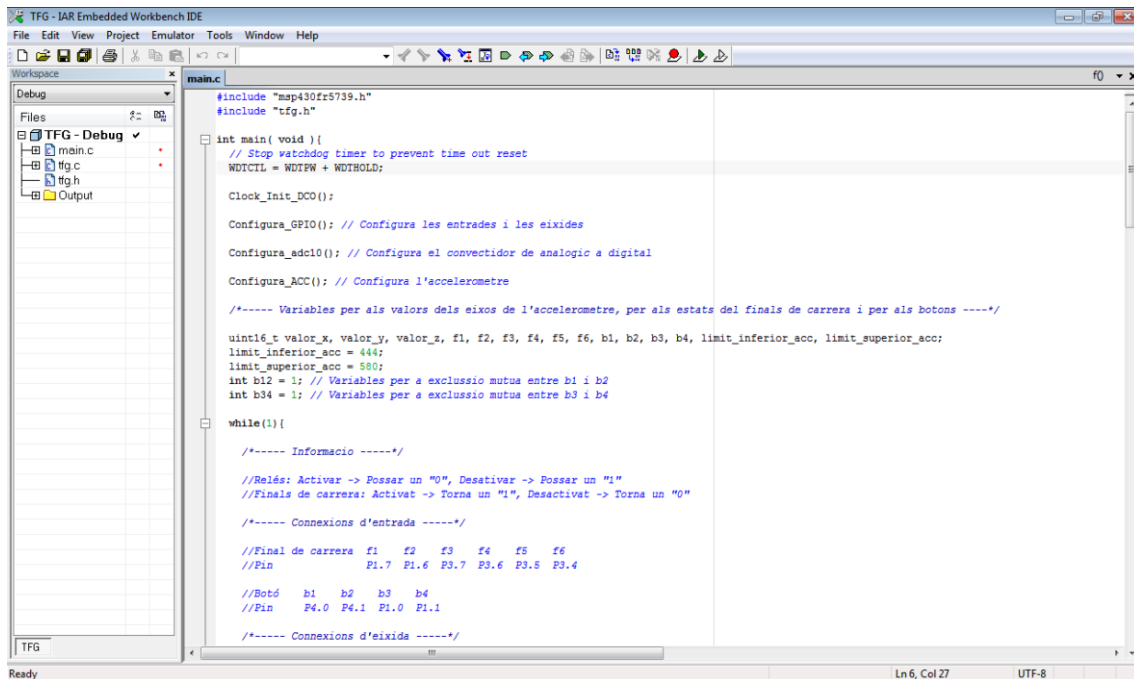


Figura 42: Entorn IAR Embedded Workbench IDE

6.2. Llenguatge de programació

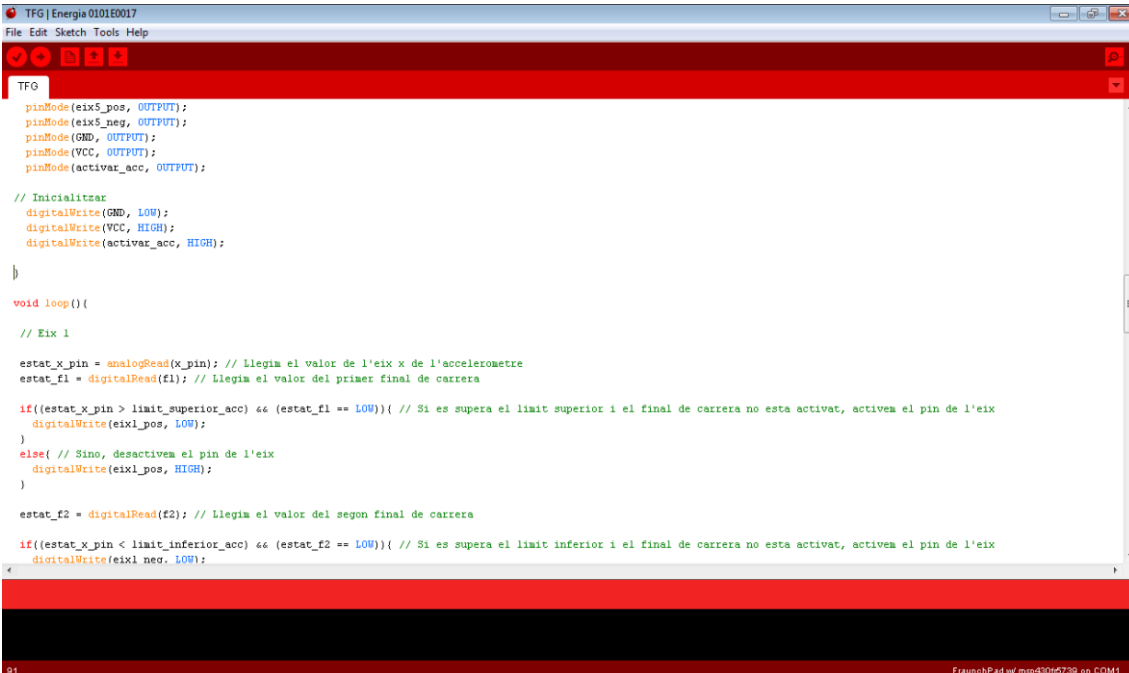
Com sols s'ha desenvolupat software per a la programació del microcontrolador, sols ha sigut necessari la utilització d'un llenguatge de programació. Al utilitzar IAR Embedded Workbench IDE el llenguatge per a desenvolupar el software ha sigut el llenguatge de programació C.

6.3. Alternatives

A continuació s'exposen dues alternatives a l'entorn descrit en l'apartat 6.1. per a la realització del codi per a la placa experimental.

6.3.1. Energia IDE

Energia IDE és un entorn de programació basat en l'entorn Arduino IDE. Aquest entorn es caracteritza per la seva simplicitat i utilitza el llenguatge de programació Java. La seva estructura de programació està formada per un mètode anomenat *setup* on es configuren els ports de la placa seleccionada en el menú. Seguidament es troba el mètode *loop*, en el qual s'incorpora la tasca a realitzar per part de la placa, com llegir un entrada o activar una eixida. Cal dir que el mètode *loop* és un bucle, és a dir, aquest mètode està sempre repetint-se indefinidament. Aquest entorn de programació es perfecte per aquelles persones que s'inicialitzen en el món de les plaques experimentals, però no per a projectes avançats.



```

TFG | Energia 0101E0017
File Edit Sketch Tools Help
TFG
pinMode(eix5_pos, OUTPUT);
pinMode(eix5_neg, OUTPUT);
pinMode(GND, OUTPUT);
pinMode(VCC, OUTPUT);
pinMode(activar_acc, OUTPUT);

// Inicialitzar
digitalWrite(GND, LOW);
digitalWrite(VCC, HIGH);
digitalWrite(activar_acc, HIGH);

}

void loop() {

// Eix 1

estat_x_pin = analogRead(x_pin); // Llegim el valor de l'eix x de l'accelerometre
estat_f1 = digitalRead(f1); // Llegim el valor del primer final de carrera

if((estat_x_pin > limit_superior_acc) && (estat_f1 == LOW)){ // Si es supera el limit superior i el final de carrera no esta activat, activem el pin de l'eix
digitalWrite(eix1_pos, LOW);
}
else{ // Sino, desactivem el pin de l'eix
digitalWrite(eix1_pos, HIGH);
}

estat_f2 = digitalRead(f2); // Llegim el valor del segon final de carrera

if((estat_x_pin < limit_inferior_acc) && (estat_f2 == LOW)){ // Si es supera el limit inferior i el final de carrera no esta activat, activem el pin de l'eix
digitalWrite(eix1_neg, LOW);
}
}

```

Figura 43: Entorn Energia IDE

6.3.2. Code Composer Studio

Code Composer Studio és un entorn de programació creat per Texas Instrument. Aquest entorn està basat en l'entorn Eclipse. Els avantatges més destacables d'aquest entorn són dos. El primer és la possibilitat de tenir diversos projectes oberts en una mateixa finestra gràcies al seu navegador incorporat a la part esquerra de l'entorn i el segon és la incorporació d'un mode *debug* per a facilitar la detecció d'errors en el funcionament. Per a programar amb aquest entorn s'utilitza el llenguatge C al igual que en el IAR Embedded Workbench IDE. I al igual que aquest, es tracta d'una ferramenta de desenvolupament completament professional.

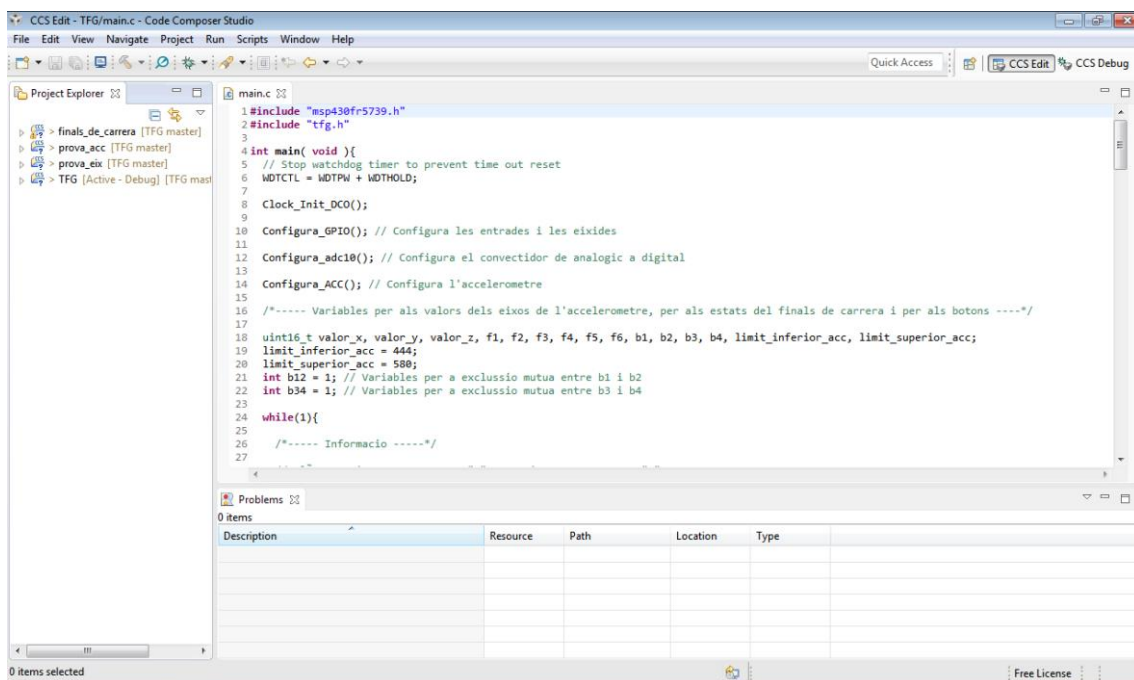


Figura 44: Entorn Code Composer Studio

7. Demostració

A continuació es mostren dos vídeos on es veu el funcionament del braç articulat. En el primer d'ells es pot veure el moviment de l'eix número u i de l'eix número dos. També es mostra com els finals de carrera eviten que els motors siguin sobreforçats quan aquests són polsats mitjançant les dues palanques incorporades, en el cas de l'eix número u, o per la peça incorporada, en el cas de l'eix número dos. Respecte al segon vídeo, mostra com amb els botons es pot controlar la ferramenta incorporada en el braç articulat, els botons incorporats en la placa experimental la fan girar en un sentit o l'altre i els botons auxiliars l'obren o la tanquen.

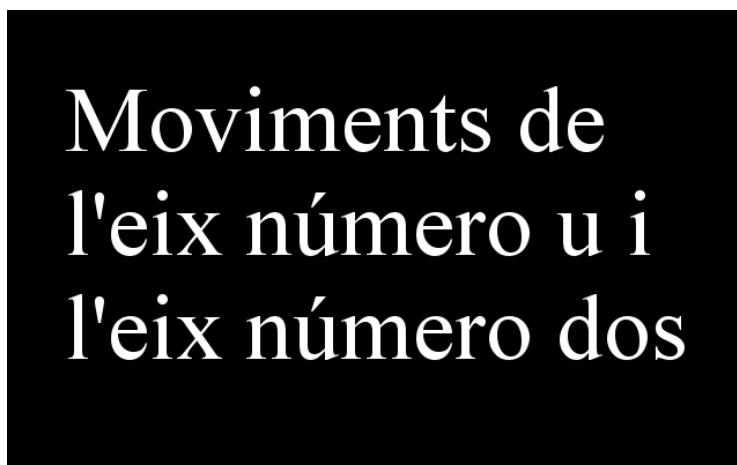


Figura 45: Vídeo demostració de l'eix número u i de l'eix número dos

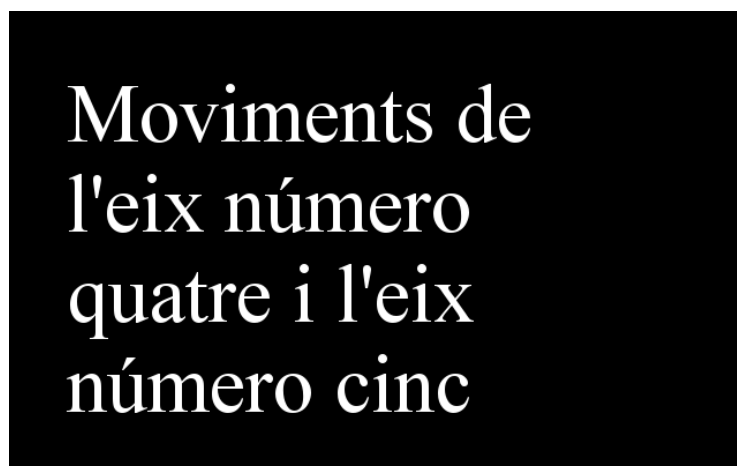


Figura 46: Vídeo demostració de l'eix número quatre i de l'eix número cinc

8. Pressupost

A continuació es mostra una taula amb els costos dels materials utilitzats per a la realització d'aquest projecte.

Descripció	Quantitat	Preu Unitari	Preu total
Brida	2	0,95 €	1,9 €
Connector femella DB9	2	0,97 €	1,94 €
Final de carrera	6	1,7 €	10,2 €
MSP- EXP430FR5739	1	31 €	31 €
Placa 4 relés	1	3,54 €	3,54 €
Placa 8 relés	1	7,99 €	7,99 €
Protoboard	1	1 €	1 €
Regleta	4	1 €	4 €
Suport de fusta	1	2 €	2 €
Tub termoretràctil	16 (m)	1,25 €	20 €
Total			83,57 €

Figura 47: Taula pressupost

9. Conclusió

A nivell personal estic molt satisfet amb el treball realitzat, ja que per a mi era la primera vegada que feia un projecte d'aquestes dimensions, sobretot amb la implicació de diversos dispositius electrònics que interactuen entre ells. També he après moltes coses noves, ja que molts dels dispositius no sabia com funcionaven com per exemple un relé o un acceleròmetre.

A més, podem dir que tots els objectius plantejats en l'apartat 1.3. i els requeriments de l'apartat 2 han sigut completats en la seua totalitat. Prenent com a base aquest projecte, es podrien implementar una sèrie de millores que facilitarien la utilització del sistema. Les millores que podrien ser implementades serien les següents:

- Incorporació d'una segona placa experimental per a substituir els botons i poder moure els eixos número quatre i número cinc segons la seva inclinació al igual que la utilitzada amb els altres tres eixos restants.
- Una comunicació per ràdio entre el braç articulat i la placa experimental o plaques experimentals per a no tenir la limitació de moviment donada pel cablejat entre aquests components.
- Determinar la velocitat a la que gira el braç articulat segons la inclinació de la placa experimental, és a dir, relacionar la inclinació aplicada a la placa experimental amb la velocitat de gir del braç articulat.
- Una manipulació més real, com per exemple la manipulació realitzada amb els comandaments de les videoconsoles. Per exemple, no inclinar la placa experimental per a girar el braç articulat, sinó realitzar el moviment que es desitja amb la placa experimental.

10. Bibliografía

Acelerómetro. (2016, 28 de marzo). *Wikipedia, La enciclopedia libre*. Des de <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Aceler%C3%B3metro&oldid=90107966>.

CEMBRANOS NISTAL, F. J. (2004). Automatismos eléctricos, neumáticos e hidráulicos.

Devices, A. (2010). ADXL335: Small, Low Power, 3-Axis±3 g Accelerometer. *ADXL335 Data Sheet Rev B, Jan*.

MARTÍN TÓRTOLA, D. A. N. I. E. L. (2014). Instrumentación, control y acceso remoto de un brazo articulado mediante sistema microcontrolador (Doctoral dissertation).

Pont, M. (2001). Patterns for time-triggered embedded systems. Harlow: Addison-Wesley.

Pont, M. (2002). Embedded C. London: Addison-Wesley.

Relé. (2016, 11 de junio). *Wikipedia, La enciclopedia libre*. Des de <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Rel%C3%A9&oldid=91625981>.

Zurell, K. (2000). C Programming for embedded systems. Lawrence, Kan.: CMP Media.